This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

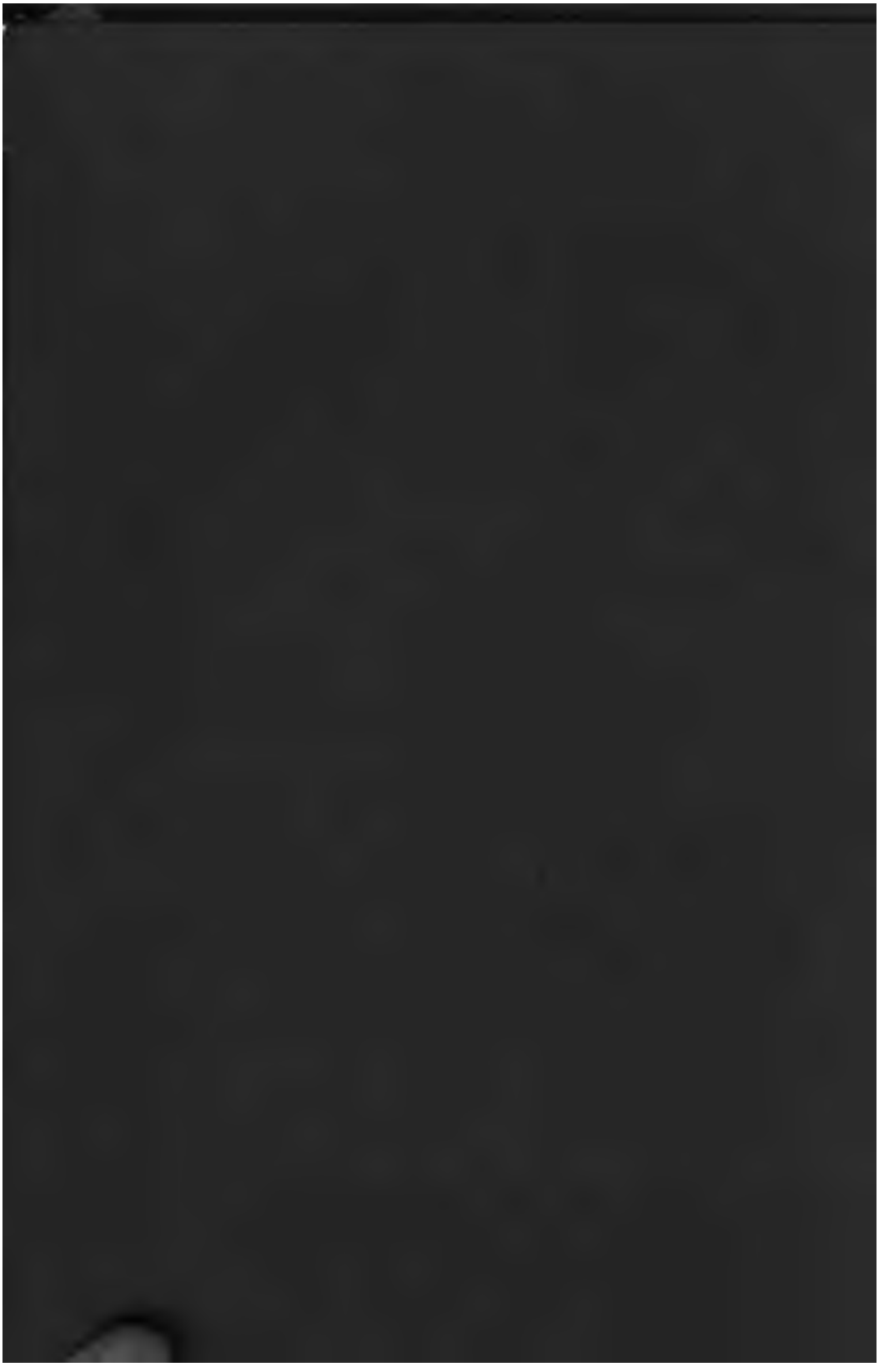
Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

raetz

Die Elektrizität und ihre Anwendungen

LANE MEDICAL LIBRARY STANFORD
B521 .G73 1906 STOR
Die Elektrizitat und ihre Anwendungen /
24503285743

LANE
MEDICAL LIBRARY
GIFT
Dr. C.M.Richter



Die Elektrizität

und ihre Anwendungen.

DIE

ELEKTRIZITÄT

UND

IHRE ANWENDUNGEN.

VON

Dr. L. GRAETZ,
PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN.

MIT 595 ABBILDUNGEN.

ZWÖLFTE AUFLAGE.
(40. bis 46. Tausend.)

STUTTGART.
VERLAG VON J. ENGELHORN.
1906.

ALLE RECHTE VORBEHALTEN.

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

G 73
1906

Vorwort zur zwölften Auflage.

Auch in der zwölften Auflage hat dieses Buch infolge des Fortschreitens der Wissenschaft und Technik der Elektrizität wieder erhebliche Vermehrungen erfahren. Die Beziehungen zwischen der Elektrizität und dem Licht, welche früher von der Behandlung ausgeschlossen waren, wurden jetzt wegen ihrer immer mehr hervortretenden großen wissenschaftlichen Bedeutung in einem eigenen, neu hinzugefügten Kapitel dargestellt, welches sowohl das Faradaysche, wie das Zeemansche Phänomen, wie auch die aktinoelektrischen Erscheinungen dem Verständnis näher zu bringen sucht. Die Kapitel über Radioaktivität sowie über die drahtlose Telegraphie wurden den neuesten Fortschritten entsprechend nicht unerheblich erweitert. Auch sonst wurde in allen Teilen des Werkes der neueste Stand der Wissenschaft und Technik berücksichtigt, manches allmählich wichtig Gewordene aufgenommen, Veraltetes weggelassen. Von den neu oder ausführlicher behandelten Gegenständen seien hier nur kurz einige angeführt: der Halbringelektromagnet, die Wismutspirale, das Panzergalvanometer, der Simonunterbrecher, die Wirkung einer Kapazität im Wechselstromkreis, die Abstimmung oszillierender Spulen, die Spannungsänderung bei Wechselstrommaschinen, die Tantallampe, das Janussystem der Telephonie, die Pupinspulen.

Bei den Korrekturen wurde der Verfasser wiederum von Herrn Prof. Dr. K. Stöckl in Passau auf das sorgfältigste und eifrigste unterstützt, wofür er demselben auch hier seinen besten Dank ausspricht.

Der Verfasser hofft, daß das Werk, das auch in der Ausstattung mit Abbildungen wieder wesentliche Verbesserungen und Bereicherungen aufweist, die alten Freunde sich erhalten und neue dazu erwerben möge.

München, Oktober 1905.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung . . . . . XIII—XVI

I. Teil.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität. S. 1—346

1. Kapitel. **Die Reibungselektrizität** . . . . . 3—43

Grunderscheinungen. Anziehung und Abstoßung. Positive und negative Elektrizität. Isolatoren und Leiter. Elektroskop. Elektrizitätsmenge. Coulombsches Gesetz. Einheit der Elektrizitätsmenge. Dielektrika. Elektrisiermaschine. Gleichgewicht der Elektrizität. Verteilung der Elektrizität auf einem Leiter. Elektronen. Spannungsunterschied. Spannung. Einheit derselben. Kapazität. Einheit derselben. Spannungsmesser von Exner, Braun. Elektrische Energie. Dichtigkeit. Spitzen. Influenz. Änderung der Kapazität durch Influenz. Kondensator. Dielektrizitätskonstanten. Leydener Flasche. Spitzenwirkung. Influenzmaschine von Holtz. Wimshurstmaschine. Entladungserscheinungen. Multiplikator. Quadrantelektrometer. Eichung desselben. Elektronen. Fernkräfte und vermittelte Kräfte. Maxwellsche Theorie. Dielektrizitätskonstante und Brechungsindex.

2. Kapitel. **Kontaktelektrizität. Der elektrische Strom** . . . . . 44—57

Galvanis Entdeckung. Voltas Auffassung. Spannungsunterschied. Voltasches Element. Elektromotorische Kraft. Elektrische Scheidungskraft. Leiter erster und zweiter Klasse. Galvanische Elemente. Daniell-Element, Ballonelement, Telegraphenelement, Elemente von Bunsen, Leclanché. Braunsteinelement, Beutelelement. Trockenelemente. Elektrischer Strom. Galvanoskop.

3. Kapitel. **Die Gesetze des elektrischen Stromes** . . . . . 58—74

Stromstärke. Einheit derselben. Messung derselben. Elektromotorische Kraft. Widerstand. Ohmsches Gesetz. Einheit des Widerstandes. Schaltung von Elementen. Verteilung der Spannung. Spannungsverlust. Stromverzweigung. Brückenverzweigung. Stromverzweigung zwischen zwei Elementen.

4. Kapitel. **Elektrische Apparate und Messungen** . . . . . 75—107

Galvanoskope. Unterbrecher. Kommutatoren. Tabellen für spezifische Widerstände. Widerstandskoeffizienten. Metalle, Flüssigkeiten, Isolatoren. Selenzellen. Normalohm. Rheostaten. Starkstromrheostaten. Messung des Widerstandes von Drähten. Wheatstonesche Brücke. Einrichtung derselben beim Universalgalvanoskop. Widerstand von Flüssigkeiten. Universalmeßbrücke. Thomsonbrücke für sehr kleine Widerstände. Normalelemente. Messung der elektromotorischen Kraft. Kompensationsmethode. Messung der Klemmenspannung. Voltmeter. Universalgalvanometer. Messung der Stromstärke mit diesen Instrumenten. Kompensationsapparat.

Seite

5. Kapitel. **Die Wärme- und Lichtwirkungen des elektrischen Stromes. Thermoelektrizität** . . . . . 108—128

Erwärmung durch den Strom. Joulesches Gesetz. Glühen von Drähten. Glühlampen. Lampenrheostat. Elektrischer Effekt. Maß desselben. Davyscher Lichtbogen. Quecksilberbogenlampe. Peltiersche Wirkung. Thermoströme. Thermoelektrische Spannungsreihe. Größe der thermoelektrischen Kräfte. Thermosäulen. Anwendung derselben zu Temperaturmessungen. Thermoelektrisches Pyrometer. Pyrometrische Messungen. Gülchersche Thermosäule. Wärme und Elektrizität.

6. Kapitel. **Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. Elektrolyse. Polarisationsströme** . . . . . 129—154

Elektrolyse. Sekundäre Prozesse. Theorie von Clausius-Arrhenius. Wanderung der Ionen. Faradaysche Gesetze. Voltameter. Messung der Stromstärke. Knallgasvoltameter. Kupfer- und Silbervoltameter. Elektrolyse in galvanischen Elementen. Ionen und Elektronen. Mit einem Äquivalent verbundene Elektrizitätsmenge. Wärmetönung und elektromotorische Kraft. Osmotischer Druck und Lösungsdruck. Erklärung der Elektrizitätserregung in galvanischen Elementen. Polarisation. Polarisationsstrom. Akkumulatoren. Ladung derselben von Zentralen. Hochspannungsakkumulatoren. Vermeidung der Polarisation durch Wechselströme. Übergangswiderstand. Aluminiumzellen.

7. Kapitel. **Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes** . . 155—197

Magnetische Kräfte. Erdmagnetismus. Horizontalintensität. Magnetisches Moment. Magnetisches Feld. Magnetische Induktion. Permanente und temporäre Magnete. Elektromagnete. Halbringelektromagnet. Wismutspirale. Magnetische Kraftlinien. Koerzitivkraft. Wärmeentwickelung beim Ummagnetisieren. Hysteresis. Magnetische Kräfte eines Stromes. Zahl der Kraftlinien. Magnetische Permeabilität. Ohmsches Gesetz für den Magnetismus. Magnetische Wage. Drehende Kräfte zwischen Magneten und Strömen. Biot-Savartsches Gesetz. Elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Solenoide. Wirkung derselben. Drehbare Stromkreise. Wirkung des Erdmagnetismus. Rotation von Strömen um Magnete und von Magneten um Ströme. Linke-Hand-Regel. Neefscher Hammer. Elektrische Klingel. Schaltung derselben. Apparate zur Strommessung. Galvanometer für starke Ströme. Präzisionsmeßapparate. Galvanometer für schwache Ströme. Multiplikatoren. Wiedemannsches Spiegelgalvanometer. Glockenmagnet. Dämpfung. Astasierung. Panzergalvanometer. Deprez-Galvanometer von Edelmann, von Hartmann & Braun, von Siemens & Halske. Magnetischer Nebenschluß. Galvanometer in Zweigleitung als Voltmeter. Ballistisches Galvanometer. Messung der Kapazität und Dielektrizitätskonstanten mittels des Galvanometers.

8. Kapitel. **Die Kraftwirkungen elektrischer Ströme aufeinander (Elektrodynamik)** . . . . . 198—205

Untersuchungen von Ampère. Parallele Ströme. Astatische Stromkreise. Gekreuzte Ströme. Rotation von Stromteilen. Elektrodynamometer von F. Kohlrausch. Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität. Magnetische Molekularströme. Erklärung der magnetischen Erscheinungen durch die Molekularströme. Umkehrung der elektromagnetischen und elektrodynamischen Erscheinungen.

9. Kapitel. **Induktion** . . . . . 206—238

Faradays Untersuchungen. Induktion durch Öffnen und Schließen des primären Stromes. Anwendung des Neefschen Hammers. In-

Seite

duktion durch Annäherung und Entfernung des primären Stromes. Magnetoinduktion. Lenzsches Gesetz. Rechte-Hand-Regel. Elektromotorische Kraft der induzierten Ströme. Schneiden der Kraftlinien. Maxwellsche Regel. Magnet und Drahtspule. Kontinuierliche Erzeugung von Induktionsströmen. Wechselströme. Magnetelektrische Maschine von Stöhrer. Telephon. Aragosche Scheibe. Wirbelströme. Dämpfung. Extraströme. Selbstpotential. Einheit desselben. Normale für Selbstinduktion. Induktionsfreie Rollen. Drosselspulen. Öffnungsfunken. Induktionsapparate. Kondensator. Federunterbrecher. Quecksilberunterbrecher. Motorunterbrecher. Deprezunterbrecher. Turbinenunterbrecher. Wehnelt- und Simon-Unterbrecher. Spannungserscheinungen. Schlagweite.

10. Kapitel. **Die Wechselströme und Drehströme** . . . . . 239—262

Erzeugung von Wechselströmen. Alternierende Spannung. Alternierende Stromintensität. Messung der Stromstärke von Wechselströmen. Präzisionsamperemeter für Wechselstrom. Messung der Spannung. Präzisionsvoltmeter für Wechselstrom. Scheinbare Vergrößerung des Widerstandes. Impedanz. Induktionsfreie und induktive Widerstände. Drosselspulen. Messung des Selbstpotentials. Summerumformer. Hochfrequenzmaschine. Zusammensetzung zweier Wechselströme. Phase. Phasenverschiebung. Phasenunterschied zwischen Spannung und Strom. Effekt von Wechselströmen. Wattlose Ströme. Präzisionswattmeter. Phasenfaktor. Messung desselben. Kondensatoren im Wechselstromkreis. Kapazität und Selbstinduktion bei Wechselströmen. Drehströme. Magnetisches Drehfeld. Verkettung von Drehströmen.

11. Kapitel. **Die elektrischen Schwingungen** . . . . . 263—287

Elektrischer Funke. Entladung von Kondensatoren. Elektrische Schwingungen. Periode derselben. Sehr rasche Schwingungen. Versuche von Hertz. Kohärer. Righischer Oszillator. Interferenz von elektrischen Wellen. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Induktionskräfte. Elektrische Strahlen. Reflexion und Brechung der elektrischen Wellen. Zusammenhang zwischen Elektrizität und Licht. Elektrische Resonanz. Abstimmung von Spulen. Induktive Koppelung, lose und eng. Galvanische Koppelung. Versuche von Tesla. Teslasche Anordnung. Einfluß des Selbstpotentials. Lichterscheinungen. Physiologische Unwirksamkeit der Teslaströme.

12. Kapitel. **Der Durchgang der Elektrizität durch Gase. Die Röntgenstrahlen** . . . . . 288—309

Elektrischer Funke. Schlagweite und Spannung. Geißlerröhren. Schichtung des positiven Lichts. Dunkler Raum. Hittorf-Crookessche Erscheinungen. Kathodenstrahlen. Geradlinige Fortpflanzung. Phosphoreszenzerregung. Wärmeerzeugung. Ablenkung durch den Magneten. Braunsche Röhre. Anwendung derselben. Mechanische Wirkungen. Versuche von Lenard. Negative Ladung. Theorie der Elektronen. Kanalstrahlen. Röntgenstrahlen. Fokusröhren. Antikathode. Regulierung des Vakuums. Photographische Versuche. Fluoreszenzschirme. Durchleuchtung. Kryptoskop. Entladung von Körpern durch Röntgenstrahlen. Erzeugung von Leitfähigkeit in der Luft. Mechanische Bewegungen unter dem Einfluß dieser Strahlen.

13. Kapitel. **Die Becquerelstrahlen und die Radioaktivität** . . . . 310—324

Die drei Strahlenarten bei evakuierten Röhren. Strahlung des Urans und des Thoriums. Becquerelstrahlen. Radioaktivität. Radium, Polonium, Aktinium. Nachweis und Eigenschaften derselben. Ionisierung der Luft. Photographische Wirkung. Fluoreszenzerregung. Induzierte Radioaktivität. Drei Strahlenarten, α-, β-, γ-Strahlen. Emanation. Abklingungskonstante. Zinksulfidschirm. Spintheroskop.

Seite

Wärmeerzeugung des Radiums. Zerfall des Radiums. Ramsayscher Versuch. Theorie des Atomzerfalls.

14. Kapitel. **Elektrizität und Licht** . . . . . 325—338

Faradays Anschauungen. Polarisation des Lichts. Nicols. Magnetische Drehung der Polarisationsebene. Sinn der Drehung. Zeemansches Phänomen. Schwingende Elektronen. Erklärung des Zeemanschen Triplets. Die Polarisation der Linien des Triplets. Hertzsche Entdeckung der Einwirkung des Lichts auf die Entladung. Fortführung negativer Ladungen. Lichtelektrische Zellen.

15. Kapitel. **Die elektrischen Maßeinheiten** . . . . . 339—346

Zurückführbarkeit aller Messungen auf Messung von Längen, Zeiten und Massen. Grundeinheiten. Absolutes (C.G.S.) System. Abgeleitete Einheiten. Mechanische Größen. Magnetische Einheiten. Elektromagnetisches Maßsystem. Bestimmung des Ampere und Ohm, Volt und Farad.

II. Teil.

Die Anwendungen der Elektrizität. S. 347—653

1. Kapitel. **Die Dynamomaschinen für Gleichstrom** . . . . . 349—384

Verschiedene Arten der Stromerzeugung. Magnetoinduktion. Magnetelektrische Maschinen. Grammescher Ring. Ankerrückwirkung. Das Dynamoprinzip. Dynamomaschinen. Verschiedene Schaltung derselben. Trommelanker von Hefner. Wickelung desselben. Allgemeine Eigenschaften der magnetelektrischen und Dynamomaschinen. Funken am Kommutator. Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung. Elektrischer Effekt. Absolutes Güteverhältnis. Magnetische Disposition. Zahnanker. Multipolare Maschinen. Aufbau moderner Maschinen. Maschinen der Siemens-Schuckertwerke, der A.E.G. Unterrichtsdynamos von C. und E. Fein. Klemmenspannung und Stromstärke bei verschiedenem äußeren Widerstand für Hauptstrom-, Nebenschluß-, Compoundmaschinen. Regulierung der Nebenschlußmaschinen. Voltmeter und Amperemeter der A.E.G. und von Siemens & Halske. Schaltung der Volt- und Amperemeter.

2. Kapitel. **Die Dynamomaschinen für Wechselstrom und Drehstrom** . 385—402

Wechselstrommaschinen. Allgemeiner Bau derselben. Schleifen- und Wellenwickelung. Wechsel- und Drehstrommaschinen der Siemens-Schuckertwerke. Maschinen der A.E.G. Gleichstromanker. Mordeyprinzip. Maschinen von Oerlikon. Ankerrückwirkung. Spannungsregulierung. Amperemeter und Voltmeter für Wechselstrom von Siemens & Halske. Hitzdrahtmeßinstrumente von Hartmann & Braun. Profilinstrumente. Elektrostatisches Voltmeter. Wattmeter. Vergleich der Dynamomaschinen mit galvanischen Elementen.

3. Kapitel. **Die Akkumulatoren** . . . . . 403—422

Polarisationsströme. Sekundäre Elemente. Plantésches Element. Formierung des Planté-Elementes. Faureches Verfahren. Chemie der Bleiakkumulatoren. Kapazität und Nutzeffekt der Akkumulatoren. Hagener Akkumulatoren. Der Edison-Akkumulator. Benutzung von Nebenschlußdynamos zum Laden. Zellenschalter. Doppelzellenschalter. Ausschalter, Umschalter. Schaltung von Maschinen, Akkumulatoren und Lampen. Anwendung der Akkumulatoren.

4. Kapitel. **Die Transformatoren, Umformer und Gleichrichter** . . . 423—438

Effekt eines Stromes. Vorzüge hoher Spannung bei Fernleitung. Transformation elektrischer Energie bei Wechselströmen. Sekundär-

Seite

generatoren. Parallelschaltung der Transformatoren. Kerntransformatoren, Manteltransformatoren. Transformatoren der Siemens-Schuckertwerke. Öltransformatoren. Drehstromtransformatoren der Siemens-Schuckertwerke, der A.E.G. Umformung von Gleichströmen. Wechselstrom-Gleichstromumformer. Rotierende Umformer. Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom durch Drosselzellen. Graetzsche Schaltung. Form der Zellen.

5. Kapitel. **Das elektrische Bogenlicht** . . . . . 439—463

Entstehung des Bogenlichts. Aussehen des Flammenbogens. Benutzung von gleichgerichteten oder Wechselströmen. Lichtstärke. Photometrie. Lummer-Brodhunsches Photometer. Hefnersche Normallampe. Elektrische Regulierung des Kohlenabstandes. Elektrische Lampen. Lampe für Einzellicht von Hefner-Alteneck. Hauptstromlampe. Nebenschlußlampe. Differentiallampe. Vergleich der drei Regulierungsarten. Kriziksche Stäbe. Lampen der Siemens-Schuckertwerke. Fixpunktnebenschlußlampe der A.E.G. Zusatzwiderstände. Dauerbrandbogenlampen. Wechselstromlampen. Motorlampe der A.E.G. Transformatoren und Drosselspulen für Bogenlampen. Flammenbogenlampen. Liliputlampe. Allgemeine Eigenschaften des Bogenlichts.

6. Kapitel. **Das elektrische Glühlicht und die elektrischen Koch- und Heizapparate** . . . . . 464—491

Joulesche Wärme. Anwendung der Kohle zum Glühen. Evakuation der Glasgefäße. Edisonsche Lampen. Präparation der Kohle. Kontakte. Fassungen. Effekt der Lampen. Formen der Glühlampen. Speziallampen. Anschlußdosen. Steckkontakte. Parallelschaltung. Nebenschlußmaschinen. Ausschalter. Serienschalter. Korrespondenzschalter. Kurzschluß. Sicherungen. Nernstlampen. Auer-Oslampen. Tantallampen. Elektrisches Kochen. Vergleich der elektrischen Wärmeerzeugung mit der durch direkte Verbrennung. Zahl der Wattstunden für eine Kalorie. Berechnung der Drahtwiderstände. Anordnung derselben. Kochapparate. Verschiedene Schaltungen. Prometheus-Heizapparate. Elektrische Öfen. Lötkolben mit Lichtbogenheizung.

7. Kapitel. **Die Arbeitsleistung durch Elektromotoren** . . . . . 492—510

Doppelte Verwendung der Dynamomaschinen. Elektromotoren mit Nebenschlußwickelung. Eigenschaften derselben. Anlasser und Stufenschalter. Kleinmotoren. Hauptstrommotoren. Große Anzugskraft derselben. Drehstrommotoren. Anlassen und Regulieren derselben. Gegenschaltung. Wechselstrommotoren. Erklärung der Einphaseninduktionsmotoren. Einphasige Kollektormotoren. Einige Anwendungen der Elektromotoren. Verteilung der Arbeit. Parallelschaltung.

8. Kapitel. **Die elektrische Kraftübertragung** . . . . . 511—523

Anwendbarkeit der Kraftübertragung. Vorgänge bei der Kraftübertragung. Nutzeffekt der Kraftübertragung. Beispiel. Kraftübertragung auf große Entfernungen. Hochgespannte Ströme. Kraftübertragung von Lauffen a. N. nach Frankfurt a. M. Sicherung der Hochspannungsanlagen gegen Blitzschlag. Hörnerblitzableiter. Kraftverteilung.

9. Kapitel. **Die Verteilung elektrischer Energie** . . . . . 524—536

Serienschaltung. Parallelschaltung. Konstante Klemmenspannung. Kabel. Verbindungskasten. Wattstundenzähler von Aron. Elektrizitätszähler von Thomson. Zweileitersystem. Dreileitersystem. Spannungsteiler. Verteilung durch Wechselströme mit Transformatoren. Parallelschaltung der Transformatoren und Verbrauchsapparate.

Seite

10. Kapitel. **Die elektrischen Bahnen, Boote und Automobile** . . . . 537—555

Elektrische Trambahnen. Zuleitung des Stromes durch die Schienen. Oberirdische Zuleitung. Trolleysystem. Kontaktrolle. Gleitbügel. Hauptstrommotoren. Kontroller. Unterirdische Stromzuführung. Akkumulatorbahnen. Gemischtes System. Elektrische Lokomotiven. Fernbahnen. Schnellbahnversuche. Geleislose Bahnen. Elektrische Automobile. Elektrische Boote. Schleppschiffahrt.

11. Kapitel. **Die Elektrochemie** . . . . . 556—575

Elektrolyse. Gesetz von Faraday. Verschiedene Äquivalentgewichte. Polarisation. Betriebsspannung. Verringerung der Spannung. Oxydationsarbeit an der Anode. Stromdichtigkeit. Elektrometallurgie. Darstellung von Reinkupfer aus Schwarzkupfer. Elmorésche Kupferröhren. Gewinnung des Reinkupfers aus den Erzen nach Siemens. Gewinnung von Zink. Gewinnung des Zinns aus Weißblechabfällen. Goldgewinnung von Siemens & Halske. Aluminiumgewinnung. Elektrischer Schmelzofen. Versuche von Moissan. Karbide. Calciumkarbid. Acetylen. Elektrolytisches Bleichverfahren. Ozonerzeugung. Ozonröhre. Anwendungen des Ozons.

12. Kapitel. **Die Galvanoplastik** . . . . . 576—584

Galvanostegie und Galvanoplastik. Einrichtung der Bäder. Stromdichtigkeit und Spannung. Versilberung. Verkupferung. Vergoldung. Vernickelung. Verstählung. Anwendung von Nebenschlußmaschinen. Anschluß der Bäder an Zentralen. Metallisieren. Herstellung von Klischees. Gravieren und Inkrustieren der Metalle.

13. Kapitel. **Die Telegraphie** . . . . . 585—604

Historisches. Erdleitung. Morsescher Schreibtelegraph. Taster. Morse-Apparat. Relais. Polarisiertes Relais. Morse-Alphabet. Farbschreiber. Selbstauslösung. Typendruckapparat von Hughes. Kopiertelegraphen. Oberirdische Leitung. Unterirdische Leitung. Kabel. Kabeltelegraphie. Verzögerung des Stromes. Entladungsstrom. Mittel zu seiner Beseitigung. Syphonrekorder.

14. Kapitel. **Telephon und Mikrophon** . . . . . 605—632

Prinzip des Telephons. Spezielle Art der Kraftübertragung. Telephon von Bell. Tonhöhe, Tonstärke, Klangfarbe. Telephone mit Hufeisenmagneten. Verschiedene Formen des Telephons. Mikrophon. Prinzip desselben. Anwendung des Mikrophons. Stäbchenmikrophone. Körnermikrophone. Lautsprechende Telephone. Schaltung von Telephon, Mikrophon und Klingel. Einrichtung zweier Stationen. Mikrotelephone. Linienwähler. Schaltung der Telephone mit Linienwähler. Anwendung des Telephons in Städten. Vermittelungsämter. Klappenschränke. Janussystem. Vielfachumschalter von Mix & Genest. Telephonische Fernverbindungen. Ladungsströme. Pupinsche Spulen. Singende Bogenlampe.

15. Kapitel. **Die drahtlose Telegraphie** . . . . . 633—653

Elektrische Schwingungen. Kohärer. Righischer Oszillator. Anordnungen von Marconi. Antennen. Stehende Schwingungen. Braunscher Flaschenkreis. Direkte und induktive, enge und lose Koppelung. Magnetischer Detektor von Marconi. Elektrolytischer Detektor. Telefunkensystem. Resonanz. Abstimmung. Wellenmesser. Ausgeführte Schaltungen. Unterteilte Funkenstrecke. Einfluß der Erdoberfläche. Anwendungen und Erfolge der drahtlosen Telegraphie. Rückblick.

Register . . . . . 654—659

Einleitung.

Das einzige Gebiet der Physik, welches nur durch eine große Reihe schwieriger Untersuchungen überhaupt bekannt werden konnte, ist das Gebiet der Elektrizität. Für alle anderen Naturerscheinungen, die reinen Bewegungen, den Schall, das Licht, die Wärme haben wir von der Natur selbst schon die einfachsten Hilfsmittel zu ihrer Erforschung mitbekommen, unsere Sinne; wir fühlen, wir sehen, wir hören sie. Wenn auch die Sinne oft uns täuschen, und wenn wir auch zu einer sicheren, gründlichen Kenntnis dieser Erscheinungen uns nicht auf die direkten Angaben unserer Sinne verlassen dürfen, so haben wir durch sie doch wenigstens den Vorteil, daß sie uns in vielen Fällen unmittelbar angeben, ob Erscheinungen vorhanden sind oder nicht. Dieses wichtige Hilfsmittel für die Erforschung der Natur geht uns bei der Elektrizität vollständig ab. Wir haben leider keinen elektrischen Sinn. Zum Glück aber hat die Elektrizität unter anderen die höchst willkommene Eigenschaft, daß sie sich leicht und fast ohne unser Zutun in andere Erscheinungsformen verwandelt. Dadurch erst wird diese Kraft, welche die größte Rolle in der Natur spielt, unseren Sinnen zugänglich. Statt eigener Sinnesorgane wenden wir andere Hilfsmittel, Apparate, an, welche uns nicht nur das Vorhandensein der Elektrizität anzeigen, sondern uns auch ihre quantitativen Verhältnisse, ihre größere und geringere Menge, Dichtigkeit, Spannung u. s. w. zu messen gestatten. Die leichte Umwandlungsfähigkeit der Elektrizität dient uns eben dazu, Apparate zu konstruieren, welche ohne weiteres das Vorhandensein der Elektrizität anzeigen und das Maß für ihre quantitativen Verhältnisse geben.

Durch derartige Methoden und Untersuchungen aber hat sich allmählich gezeigt, daß das Gebiet der Elektrizität das umfassendste

in der Natur ist, daß die Elektrizität mit fast allen anderen Naturerscheinungen, dem Licht, der Wärme, den chemischen Vorgängen in einem sehr engen Zusammenhang steht, in einem so engen Zusammenhang, daß wir jetzt sogar das Licht, obwohl es scheinbar ganz anderer Natur ist, als eine elektrische Erscheinung auffassen müssen.

Diese ungemein vielseitige Verknüpfung der Elektrizität mit den anderen physikalischen und chemischen Vorgängen war auch der Grund, warum man lange sich keine stichhaltige, begründete und insbesondere widerspruchslose Vorstellung davon machen konnte, was eigentlich Elektrizität ist. Man sah zwar deutlich, daß viele elektrische Erscheinungen sich in dem Lichtäther abspielen, in welchem, wie in einem großen Ozean, wir alle leben, so daß man sie als Vorgänge in dem Äther betrachten mußte, aber man sah auch, daß man es im Gebiete der Elektrizität nicht bloß mit den Bewegungen und Zuständen des Äthers zu tun hat, sondern daß auch die körperliche Materie, die Moleküle und Atome derselben dabei mitwirken. Und gerade diese Doppelbeziehungen machten es schwierig, ein vollkommenes Bild, eine Erklärung für die elektrischen Erscheinungen zu ersinnen. Manche Eigenschaften der Elektrizität z. B. sind sehr analog denen eines Stromes, so daß man ganz zweckmäßig von einem elektrischen Strom sprechen kann, andere aber, z. B. die magnetischen Wirkungen in der Umgebung eines Stroms, wieder nicht. Diese verhalten sich vielmehr wie Vorgänge im Äther. Es ist schon ein großer Fortschritt, daß wir jetzt wenigstens mit einiger Sicherheit trennen können, welche von den elektrischen Erscheinungen Äthervorgänge und welche materielle Vorgänge sind. Die Vorstellung, welche jetzt im Vordergrund der wissenschaftlichen Betrachtung steht, und welche in der Tat Klarheit in viele sonst unverständliche Erscheinungen bringt, ist die, daß die Elektrizität selbst eine Art Materie ist, die wie die anderen Stoffe, in kleinste Teilchen, Elektronen genannt, geteilt ist, daß aber diese Elektronen in einer engen Verknüpfung mit dem Äther stehen, so daß jede Bewegung eines Elektrons auch eine Bewegung im Äther zur Folge hat und umgekehrt. Wie weit es bisher möglich ist, durch diese Anschauung die elektrischen Erscheinungen verständlich zu machen, ist an geeigneten Stellen in dem Werke dargelegt.

Historisch hat sich unsere Kenntnis der elektrischen Erscheinungen so entwickelt, daß lange Jahrhunderte hindurch die Erscheinungen *der* Reibungselektrizität allein bekannt waren, daß man nur durch

Reibung Elektrizität erzeugen und die Erscheinungen verfolgen konnte, welche die Elektrizität im Gleichgewicht zeigt. Erst als am Ende des XVIII. Jahrhunderts, im Jahre der französischen Revolution 1789, Galvani, oder, wie eine Erzählung behauptet, eigentlich seine Frau, ganz zufällig eine elektrische Wirkung beobachtete, bei der jede durch Reibung erzeugte Elektrizität ausgeschlossen war, erst seit dieser Zeit lernte man in den chemischen Prozessen eine Quelle kennen, die in unvergleichlich größeren Mengen Elektrizität liefert, als man durch Reibung erzeugen kann, und die durch ihre besondere Erscheinungsform sofort die Kenntnisse von den Eigenschaften und Wirkungen der Elektrizität um ein Bedeutendes erweiterte. Von dieser Zeit an fand ein stetiger ungehemmter Fortschritt in der Untersuchung der Elektrizität und ihrer Wirkungen statt. Eine glänzende Reihe von Namen hervorragender Männer bezeichnet den Fortschritt der Elektrizitätslehre. Durch ihren Scharfsinn und ihre Experimentierkunst brachten Männer wie Faraday, Ampère, Weber, Ohm, Joule, Davy, Seebeck, Oerstedt, Helmholtz, Maxwell, Hertz die Kenntnis der elektrischen Erscheinungen zu einer ungeahnten Höhe. Faraday insbesondere war es, der durch die großartigsten Entdeckungen, durch die originellsten Methoden, durch die scharfsinnigsten Untersuchungen nicht nur die breite Grundlage legte zu dem großen Bau, den die Elektrizitätslehre heute einnimmt, sondern der einen großen Teil dieses Baues selbst hoch in die Höhe führte, und Heinrich Hertz war es, der, trotzdem ein neidisches Geschick ihm nur eine sehr kurze Lebenszeit gab, diesen Bau noch ein großes Stück über Faraday hinaus förderte.

Diejenigen Zweige der elektrischen Erscheinungen, welche für die riesig entwickelte moderne Elektrotechnik die Grundlage bilden, die Induktionserscheinungen, gerade diese entdeckt und erforscht zu haben ist Faradays zweifelloses und ungeschmälertes Verdienst. Immer ist zwar ein großer Schritt zwischen einem im Laboratorium ausgeführten Versuch und der Anwendung dieses Versuchs für die Praxis, für die Technik, für das Leben. Aber auch hier war es wieder eine Reihe genialer Männer, welche die Anwendbarkeit der Elektrizität für die Technik erkannten und welche ihren Scharfsinn und ihre Geschicklichkeit dazu verwendeten, um diese umfassende Naturkraft der Menschheit dienstbar zu machen. Die Namen Steinheil, Jacobi, Siemens, Edison, Bell und Marconi werden stets als Namen

von Pionieren des Fortschritts geehrt werden. Steinheil richtete den ersten elektromagnetischen Telegraphen ein. Jacobi lehrte zuerst die Anwendung der Elektrizität zur Abscheidung von Metallen und zur Galvanoplastik, Siemens legte durch seine Erfindung der Dynamomaschine den Grund zu der elektrischen Beleuchtung und zur elektrischen Arbeitsleistung, sowie zu den elektrochemischen Prozessen, Edison gab die Einrichtung des elektrischen Glühlichts, Bell schenkte uns im Telephon einen Apparat, dessen Anwendungsfähigkeit ebenso groß ist wie die geniale Einfachheit seiner Konstruktionen, und Marconi endlich eröffnete durch seine Telegraphie ohne Draht das große Äthermeer dem menschlichen Verkehr.

I. Teil.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität.

I. Teil.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität.

1. Kapitel.

Die Reibungselektrizität.

Eine allgemein bekannte Erscheinung ist es, welche die Grundlage für unsere heutige Kenntnis des großen und vielverzweigten Gebietes der Elektrizität bildet. Ein Stück Bernstein (griechisch: Elektron) zeigt, wenn es mit einem Tuch gerieben wird, die Eigenschaft, leichte Körperchen anzuziehen. Kleine Papierschnitzel, leichte Holundermarkkügelchen u. s. w., in deren Nähe man geriebenen Bernstein bringt, fliegen an ihn heran. Von dieser zwar merkwürdigen, aber unscheinbaren Wirkung ist es wohl ein weiter Weg bis zu den heutigen Riesenwirkungen unserer elektrischen Maschinen, aber doch ein Weg, den, nur durch wenige zufällige Entdeckungen noch unterstützt, der menschliche Geist gefunden und gebahnt hat, und auf welchem er, langsam aber sicher fortschreitend, nicht nur die Beherrschung, sondern auch die Erkenntnis der gewaltigsten Naturkraft gewonnen hat.

Wenn wir die Erscheinung beim Bernstein kurz ausdrücken wollen, so werden wir sagen können, daß der Bernstein durch das Reiben in einen eigentümlichen Zustand versetzt wird, in welchem er im stande ist, Kräfte auszuüben, die er sonst nicht zeigt. Diesen eigentümlichen Zustand, den man durch gar nichts sonst erkennt, bezeichnet man als elektrischen. Man sagt, der Bernstein sei elektrisch geworden. Ganz ebenso wie der Bernstein werden aber eine große Reihe anderer fester Körper ebenfalls durch Reiben elektrisch. Es ist ja eine durch Spielversuche schon den Kindern bekannte Tatsache, daß Glas, Siegellack, Kautschuk, Ebonit und andere Stoffe durch bloßes Reiben mit einem Tuch oder mit Pelz die Fähigkeit erlangen, leichte Papierschnitzel, die man auf einen Tisch gestreut hat, anzuziehen. Beobachtet man aber diesen Vorgang genauer, so sieht man, daß er gar nicht so einfach ist. Einzelne von den Papierschnitzeln, die leichteren, fliegen allerdings an eine geriebene Glasstange, an eine geriebene Siegellackstange heran, aber sie bleiben nicht lange an ihr haften, sondern fliegen nach einiger Zeit wieder von ihr fort. Man kann also aus diesem Experiment bloß schließen, daß um einen durch Reiben elektrisierten Körper herum gewisse Kräfte vorhanden sind, die nicht vorhanden sind, wenn der Körper unelektrisch ist. Über die Art

dieser Kräfte und über die Ursache ihres Auftretens kann man aus diesem Experiment noch gar nichts aussagen, weil die Erscheinungen zu kompliziert sind.

Es zeigt sich aber weiter, daß die Papierschnitzel und ähnliche Körper, wenn sie mit einem elektrisierten Gegenstand nur berührt werden, selbst elektrisch werden, daß sie selbst dadurch in den Stand gesetzt werden, Kräfte auszuüben, die sie sonst nicht zeigen. Man kann dies ganz einfach experimentell nachweisen. Man hänge ein Papierstückchen oder besser ein leichtes Holundermarkkügelchen an einem Seidenfaden auf und berühre es mit einem elektrisierten Glasstab. Durch diese Berührung wird das Holundermarkkügelchen selbst elektrisch. Denn wenn man jetzt ein anderes unelektrisches Kügelchen in seine Nähe bringt, so wird dieses auch zuerst angezogen und nach kurzer Zeit wieder abgestoßen.

Fig. 1.

Dieses Verhalten gibt nun ein einfaches Mittel, um zu entscheiden, welcher Art die Kräfte sind, die zwei elektrische Körper aufeinander ausüben. Man hänge an ein Gestell zwei trockene Papierstückchen oder zwei Holundermarkkügelchen nebeneinander auf (Fig. 1). Berührt man beide mit einem elektrisch gemachten Glasstab, so werden dadurch beide in gleicher Weise elektrisch und diese beiden in gleicher Weise elektrisierten Körper stoßen sich nun sofort ab und beharren bei dieser Abstoßung. Auch werden beide von dem Glasstab abgestoßen. Ganz dasselbe findet statt, wenn man die Kügelchen nicht mit einem elektrischen Glasstab berührt hat, sondern mit einem elektrischen Siegellackstab oder Ebonitstab u. s. w. Immer stoßen sich zwei in gleicher Weise elektrisierte Körper ab.

Wenn man aber so verschiedene geriebene Substanzen benutzt, Glas, Siegellack, Ebonit, so findet man doch außer dieser Gleichheit der Wirkung auch einen wesentlichen Unterschied zwischen ihnen. Hat man die Kügelchen in Fig. 1 z. B. durch Berühren mit einem elektrischen Glasstab elektrisch gemacht, so stoßen sie sich gegenseitig ab und jedes wird auch von dem Glasstab abgestoßen. Dagegen wird jedes der beiden Kügelchen von einer elektrisierten Siegellackstange, die man in die Nähe bringt, angezogen. Auch das Umgekehrte findet statt. Wenn man die Kügel-

chen durch Berühren mit der geriebenen Siegellackstange elektrisiert, so stoßen sie sich gegenseitig ab und werden auch von der Siegellackstange abgestoßen. Dagegen werden sie von einer geriebenen Glasstange angezogen. Wir erfahren also dadurch, daß das, was wir elektrischen Zustand nennen, noch von verschiedener Art sein kann. Eine geriebene Glasstange ist in anderer Weise elektrisch, als eine geriebene Siegellackstange. Was die eine anzieht, stößt die andere ab. Man hat diese Erfahrungstatsache dadurch ausgedrückt, daß man elektrisierte Körper als positiv und negativ unterschied. Man ist übereingekommen, eine durch Reiben mit Pelz elektrisch gewordene Siegellackstange negativ elektrisch zu nennen, die geriebene Glasstange, die sich entgegengesetzt verhält, also positiv elektrisch.

Die bisher angeführten Tatsachen kann man daher ganz kurz folgendermaßen aussprechen:

Gleichnamig elektrisierte Körper stoßen einander ab, ungleichnamig elektrisierte Körper ziehen einander an.

Die Körper, von denen bisher die Rede war: Glas, Siegellack, Ebonit, Kautschuk, Papier, Holundermark u. s. w., waren lauter unmetallische Stoffe. Diese Körper zeigen in elektrischer Beziehung zwei Eigenschaften. Erstens, sie werden durch Reiben leicht elektrisch, und zwar nur an den Stellen, an denen sie gerieben wurden, und zweitens, sie behalten ihren elektrischen Zustand, wenn er einmal erregt ist. Ganz wesentlich anders verhalten sich die Metalle und ebenso wie diese auch eine Reihe anderer Substanzen, viele Flüssigkeiten, feuchtes Holz, Erde u. s. w., ebenso verhält sich insbesondere auch der menschliche Körper. Hält man nämlich einen Metallstab in der Hand und reibt ihn, so findet man keine Spur von elektrischer Wirkung, keine Anziehungen auf Papierschnitzel oder dgl. Trotzdem ist der elektrische Zustand auf ihm erzeugt worden. Aber die Metalle und die anderen erwähnten Körper haben noch die weitere Eigenschaft, daß sich dieser elektrische Zustand mit der größten Leichtigkeit und Schnelligkeit über ihre ganze Oberfläche verbreitet. Daher bleibt auf einem geriebenen Metallstab der elektrische Zustand nicht an der geriebenen Stelle allein, sondern verbreitet sich sofort über das ganze Metall, und wenn er in der Hand gehalten wird, über die Hand und den ganzen Körper des Menschen, über den Fußboden und die Wände des Zimmers, in dem man sich befindet, schließlich über die ganze Erde, so daß er auf eine so überaus große Fläche verteilt ist, daß an jeder einzelnen Stelle seine Wirkung zu klein ist, um erkannt zu werden. Man bezeichnet diese Verteilung des elektrischen Zustandes kurz dadurch, daß man sagt, die Elektrizität ist zur Erde abgeleitet.

Daraus folgt: Will man ein Metall in den elektrischen Zustand versetzen, so darf man es nicht direkt in der Hand halten, sondern man muß es mit einem Griff von Glas, Siegellack, Ebonit u. s. w. versehen. Ebenso überspinnt man aus diesem Grund Drähte mit Seide oder umgibt sie mit Kautschuk. Nur dann bleibt der elektrische Zustand auf dem Metall, wenn er dort entwickelt wurde, und wird nicht abgeleitet und verbreitet. Man sagt von einem solchen Metall, es sei isoliert. In der Tat kann

man ein isoliertes Metallstück durch Reiben elektrisch machen und in diesem Zustand erhalten.

Man unterscheidet also in elektrischer Beziehung zwei Klassen von Körpern. Die Stoffe, wie Glas, Siegellack u. s. w., nennt man Isolatoren, weil sie die Elektrizität auf sich bewahren, isolieren, wenn sie einmal auf ihnen erregt ist. Die Metalle und die erwähnten anderen Stoffe nennt man Leiter oder Konduktoren, weil sie die Elektrizität sofort weiterleiten.

Auf einem unisolierten Leiter kann man also den elektrischen Zustand nicht herstellen, weil er sich sofort über die ganze Erde verbreitet.

Auf einem isolierten Leiter dagegen kann man den elektrischen Zustand durch Reiben oder Berühren leicht herstellen. Derselbe bleibt auf ihm bestehen, weil eben der Leiter isoliert ist. Nicht nur die wirklich geriebenen oder berührten Teile werden elektrisch, sondern der Leiter in seiner ganzen Oberfläche. Die Elektrizität verbreitet sich sofort über die ganze Oberfläche des Leiters. Berührt man einen elektrisierten Leiter mit der Hand, so wird er vollständig unelektrisch, nicht nur an dem berührten Punkte, sondern überall, weil die ganze Elektrizität zur Erde abgeleitet wird.

Man sieht daraus zunächst rein praktisch, daß ein isolierter Leiter für elektrische Untersuchungen große Vorzüge vor einem Isolator hat. Ein Leiter muß, wenn er bloß an einer Stelle mit einem elektrisierten Körper berührt wurde, überall elektrisch werden, und kann ebenso einfach durch bloßes Ableiten an einer Stelle ganz unelektrisch gemacht werden. Man verwendet deshalb für elektrische Untersuchungen gewöhnlich isolierte Leiter.

Die erste Anwendung, die man von diesem Verhalten der Leiter machen kann, ist die Konstruktion eines zweckmäßigen Apparates, der dazu dient, anzuzeigen, ob ein Körper elektrisch ist oder nicht, eines Elektroskops. Man nimmt (Fig. 2) zwei leichte Streifchen von Blattgold als leitende Körper, befestigt diese an einem metallenen Stäbchen, das an seinem anderen Ende eine metallene Kugel, einen Knopf, trägt, und steckt das Stäbchen isoliert, durch Paraffin oder Bernstein, in ein Gehäuse mit Glaswänden. Damit ist ein einfaches Elektroskop konstruiert. Sobald der Knopf des Apparates mit einem elektrischen Körper berührt wird, wird ihm etwas Elektrizität mitgeteilt; diese verteilt sich über das Stäbchen und die Streifchen von Blattgold, da diese ja Leiter sind, und die beiden leichten Streifchen stoßen einander ab, da sie ja gleichnamig elektrisiert sind. Es zeigt sich also die Elektrizität eines Körpers, mit dem man den Knopf berührt, durch die Divergenz der Goldblättchen an. Man nennt den Apparat ein Goldblattelektroskop. Man kann diesen Apparat sofort dazu benutzen, um auf einfache Weise zu untersuchen, welche Körper durch Reiben positiv elektrisch werden und welche negativ. Man berührt z. B. den Knopf des Elektroskops mit einer geriebenen Siegellackstange. Dann werden die Goldblättchen negativ elektrisch und stoßen sich ab. Bringt man nun an den Knopf einen anderen negativ elektrischen Körper, so werden die Goldblättchen stärker negativ und divergieren infolgedessen mehr als früher; bringt man aber einen positiv elektrischen Körper heran, so werden die Goldblättchen schwächer negativ

und divergieren infolgedessen weniger. Diese Methode besitzt zwar noch viele Mängel, aber schon auf diese Weise kann man untersuchen, welche Körper durch Reiben positiv und welche negativ elektrisch werden.

Auf diese Weise findet man, daß durch Reiben zweier elektrischer Körper aneinander immer b e i d e K ö r p e r elektrisch werden, und zwar der eine immer positiv, der andere negativ. So wird Siegellack durch Reiben mit Pelzwerk negativ, das Pelzwerk selbst positiv elektrisch. Glas wird durch Reiben mit Zinnamalgam (das man auf Leder aufstreicht) positiv, das Amalgam negativ elektrisch. Harze und Schwefel werden durch Reiben mit Wolle oder Seide oder Leinen negativ elektrisch, die Wolle u. s. w. werden dabei positiv elektrisch.

Fig. 2.

Eine zweite, wichtige Anwendung des Goldblattelektroskops besteht darin, zu untersuchen, ob ein Körper ein Leiter ist oder ein Isolator. Hat man die Goldblättchen durch Elektrisieren zur Divergenz gebracht, so bleiben sie so lange divergent, als ihre Elektrizität nicht zur Erde abgeleitet wird. Berührt man den Knopf des Elektroskops mit einer (unelektrischen) Glasstange, so bleiben die Goldblättchen divergent, denn Glas ist ein Isolator. Berührt man ihn dagegen mit einem unisolierten Metallstab, den man in der Hand hält, oder auch bloß mit dem Finger, so fallen die Goldblättchen sofort zusammen, denn die Elektrizität hat sich sofort über die ganze Erde verbreitet. Auf diese Weise erkennt man sofort, daß die Luft ein Isolator ist. Denn der Knopf des Apparates ist ja für gewöhnlich stets mit Luft in Berührung und die Blättchen bleiben doch divergent. Man kann so alle Körper daraufhin untersuchen, ob sie Leiter oder Isolatoren sind. Aber dabei zeigt es sich, daß dieser Unterschied nicht ein ganz scharfer ist, daß vielmehr ein stetiger Übergang zwischen Leitern und Isolatoren stattfindet. Legt man nämlich ein unisoliertes Metall an den Knopf des (geladenen) Elektroskops, so fallen die Goldblättchen im Moment zusammen. Ebendasselbe geschieht, wenn man den Knopf mit der Hand oder mit Kohle oder mit feuchten Stoffen berührt. Berührt man den Knopf

dagegen z. B. mit Papier, so findet im ersten Moment kein Zusammenfallen der Goldblättchen statt, aber ganz allmählich divergieren sie immer weniger und nach mehr oder minder langer Zeit hängen sie unelektrisch nebeneinander. Berührt man den Knopf mit trockenem Glas oder mit Schellack u. s. w., so dauert es sehr lange Zeit, bis die Goldstreifchen zusammenfallen, aber am Ende hört die Divergenz doch auf, und selbst, wenn der Knopf bloß mit der Luft in Berührung ist, wird die Divergenz allmählich, in Tagen, geringer, bis sie ganz verschwunden ist. Man ersieht daraus, daß man die Körper nicht einfach streng in Leiter und Isolatoren scheiden darf, sondern daß man vielmehr sagen muß, alle Körper leiten die Elektrizität, aber in außerordentlich verschiedenem Maße. Die Metalle leiten außerordentlich gut, andere Substanzen wie Papier viel schlechter, die sogenannten Isolatoren ganz überaus schlecht. Für praktische Zwecke kann man aber die Einteilung in Leiter und Isolatoren immer beibehalten. Zu den Leitern gehören alle Metalle, ferner Kohle, Graphit, Säuren, Salzlösungen, menschliche und tierische Körper, Leinen, Baumwolle; zu den Isolatoren gehören Öle, Kautschuk, Porzellan, Leder, Wolle, Seide, Glimmer, Glas, Wachs, Paraffin, Schwefel, trockene Salze, Bernstein, Schellack, die Luft und andere Gase. Alle die letzterwähnten Substanzen, wenn sie trocken sind, kann man also zum Isolieren von Leitern benutzen.

Wenn wir einen isolierten Leiter durch Berühren mit einem elektrischen Körper, z. B. mit geriebenem Glas, elektrisch machen, so bekommt der Leiter dadurch Elektrizität von derselben Art, wie diejenige, welche der berührende Körper enthielt. Die Elektrizität bleibt auf dem Leiter nicht an der Berührungsstelle allein, sondern der ganze Leiter wird sofort elektrisch. Man sagt, die *Elektrizität verteilt sich auf dem Leiter*. Berühren wir den Leiter nun zum zweitenmal mit einem elektrischen Glasstab, so wird ihm wieder neue Elektrizität mitgeteilt, die sich auch wieder über die ganze Oberfläche des Leiters verteilt. Und so können wir dem Leiter ein drittes, ein viertes Mal Elektrizität zuführen u. s. w. Es wird dadurch der isolierte Leiter immer stärker elektrisch. Man sagt von ihm, er wird immer stärker *geladen*. Je stärker der Körper geladen ist, desto kräftiger stößt er ein aufgehängtes Markkügelchen unter sonst gleichen Umständen ab. Man kann auch in übertragener Weise dies so ausdrücken, daß man sagt, ein elektrischer Körper, der, unter sonst gleichen Umständen, eine größere Kraft auf ein elektrisiertes Markkügelchen ausübt, enthält eine größere *Elektrizitätsmenge* oder *Ladung*. Selbstverständlich unterscheidet man positive und negative Elektrizitätsmengen. Wir schließen also aus der Kraft, die ein elektrischer Körper zeigt, auf die Elektrizitätsmenge, die er enthält. Üben zwei geladene Körper die gleiche Kraft auf dasselbe geladene Markkügelchen in derselben Entfernung aus, so sagen wir, sie enthalten gleiche Elektrizitätsmengen. Übt der eine eine doppelt so große Kraft aus, so sagen wir, er enthält eine doppelt so große Elektrizitätsmenge. Wir messen dann also die gesamte Elektrizitätsmenge, die ein Körper enthält, aus der Kraft, die er auf ein in bestimmter Entfernung befindliches kleines elektrisches Markkügelchen ausübt.

Die Kraft nun, die ein elektrisierter Körper auf einen anderen ausübt, ist an Größe verschieden, je nach der Entfernung, in welcher die beiden

Körper sich voneinander befinden. Es entstand natürlich die Frage: In welcher Weise hängt diese Kraft von der Entfernung der beiden Körper voneinander ab? Um dies zu entscheiden, muß man das Experiment befragen und muß sehr kleine elektrisierte Körper daraufhin untersuchen, weil bei diesen ihre Gestalt nicht mehr von Einfluß ist. Das Grundgesetz nun, das Coulomb durch eine mühsame Untersuchung gefunden hat, lautet:

Die Kraft, welche zwei kleine elektrisierte Körper aufeinander ausüben, ist gleich dem Produkt ihrer Elektrizitätsmengen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung, und diese Kraft ist eine abstoßende, wenn die beiden Körperchen gleichnamig, eine anziehende, wenn sie ungleichnamig elektrisiert sind.

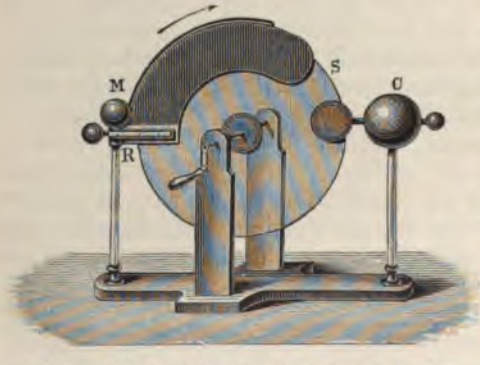
Dieses Gesetz, das im Jahre 1785 gefunden wurde, nennt man nach seinem Entdecker das Coulombsche Gesetz.

Wir können das Coulombsche Gesetz zunächst mit Leichtigkeit dazu benutzen, um Elektrizitätsmengen in genau bestimmtem Maße zu messen, d. h. um uns eine Einheit zu schaffen, in der wir alle Elektrizitätsmengen ausdrücken. Wir sahen, daß wir auf die Größe einer Elektrizitätsmenge schließen aus der Kraft, welche sie ausübt. Nun werden aber Kräfte in der Physik ein für allemal in einer bestimmten Einheit, die man 1 Dyne nennt, ausgedrückt. Es ist z. B. die Anziehungskraft, welche die Erde auf ein Kilogramm ausübt (das Gewicht eines Kilogramms), in dieser Einheit gleich 981 000 Dynen. Eine Dyne ist daher ungefähr gleich der Kraft, mit welcher die Erde ein Milligramm anzieht, also gleich dem Gewicht eines Milligramms; genauer ist das Gewicht eines Milligramms bloß gleich 0,981 Dyne. Benutzen wir diese Einheit für die Kraft, so können wir nach dem Coulombschen Gesetz sagen: wir wollen diejenige Elektrizitätsmenge als Einheit wählen, welche auf eine gleich große in der Entfernung von 1 cm befindliche eine Kraft ausübt, deren Größe gerade 1 Dyne ist. Dies ist die sogenannte elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge, weil sie aus dem Grundgesetz der Elektrostatik, dem Coulombschen Gesetz, folgt. Statt dieser Einheit braucht man aber für praktische Zwecke stets eine andere, welche dreitausendmillionenmal so groß wie die von uns bestimmte ist. Man nennt diese praktisch gebrauchte Einheit 1 Coulomb. So spricht man von 10 Coulomb, 0,5 Coulomb u. s. w., die ein elektrischer Körper enthält. Der Grund, der zur Einführung dieser Einheit geführt hat, wird später (Kap. 15) klar werden; vorläufig genügt es festzusetzen, daß wir alle Elektrizitätsmengen in Coulomb messen. Man sieht aber, daß ein Körper, der die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb enthalten würde, ganz außerordentlich große Kräfte auf einen zweiten, ebenfalls mit 1 Coulomb geladenen Körper ausüben würde, da 1 Coulomb gleich dreitausend Millionen ($3 \cdot 10^9$) elektrostatischen Einheiten ist. Schon Ladungen von 1 millionstel Coulomb bringen große Kräfte hervor. Man bezeichnet 1 millionstel Coulomb als 1 Mikrocoulomb. Wir können leicht ausrechnen, daß zwei kleine Körper, von denen jeder mit 1 Mikrocoulomb, d. h. 3000 elektrostatischen Einheiten, geladen wäre, wenn sie 1 cm Abstand voneinander haben, eine Kraft aufeinander ausüben würden, die gleich 9 Mil-

lionen Dynen, also etwa gleich dem Gewicht von 10 Kilogramm wäre. Würden wir den einen Körper mit 1 Mikrocoulomb geladen etwa auf eine Wagschale legen und den anderen mit 1 Mikrocoulomb der entgegengesetzten Elektrizität geladen 1 cm unterhalb der Wagschale anbringen, so müßten wir auf die andere Wagschale der Wage zirka 10 Kilo auflegen, um die Wage trotz der Anziehung der beiden geladenen Körper im Gleichgewicht zu halten.

Das Coulombsche Gesetz erfordert übrigens noch eine wesentliche Ergänzung, um allgemein richtig zu sein, eine Ergänzung, die erst lange nach Coulomb von F a r a d a y (1837) gefunden wurde. Nach dem Coulombschen Gesetz, wie es oben ausgesprochen wurde, scheint es, als ob die Kraft zwischen zwei elektrisierten Körpern, die bestimmten Abstand voneinander haben, immer dieselbe ist, ob sich nun Luft zwischen den Körpern befindet oder irgend eine andere Substanz, etwa Petroleum, Glas oder dgl. Das ist aber, wie Faraday fand, nicht richtig. Das Zwischenmedium zwischen den beiden geladenen Körpern wird durch die geladenen Körper selbst beeinflußt und modifiziert daher auch die Kraft zwischen ihnen und zwar so, daß diese Kraft für jedes feste oder flüssige Zwischenmedium kleiner ist, als wenn bloß die Luft dazwischen ist. Also z. B., wenn zwischen unseren beiden obigen Körpern von je 1 Mikrocoulomb Ladung nicht die Luft wäre, sondern etwa Petroleum, so wäre die Kraft zwischen ihnen nicht 10 Kilogramm, sondern, wie man mit der Wage messen könnte, nur $\frac{10}{2{,}2}$ Kilogramm, und wenn Rizinusöl dazwischen wäre, nur etwa $\frac{10}{4{,}3}$ Kilogramm. Jede (isolierende) Substanz verringert also die Kraft zwischen zwei geladenen Körpern in einem bestimmten Verhältnis. Die Zahl 2,2 im Fall des Petroleums, oder 4,3 im Fall des Rizinusöls nennt man die D i e l e k t r i z i t ä t s k o n s t a n t e der Substanz. Wir werden noch öfter von ihr zu sprechen haben.

Fig. 3.



Da wir Elektrizität durch Reiben stets erzeugen können, und da wir einem isolierten Leiter durch wiederholte Berührung mit einem elektrisierten Körper beliebige Mengen von Elektrizität mitteilen können, so liegt der Gedanke nahe, eine Maschine zu konstruieren, welche gestattet, auf bequeme Weise durch Reiben Elektrizität fortwährend zu erzeugen und zugleich einen isolierten Leiter mit ihr zu laden. Diese Aufgabe wird durch die E l e k t r i s i e r m a s c h i n e gelöst. Statt eine Glasröhre in der Hand mit Leder zu reiben, setzt man eine runde Glasscheibe S (Fig. 3) fest auf eine Achse auf, durch welche man sie mittels einer Kurbel drehen kann, und läßt nun die Glasscheibe bei der Drehung sich fortwährend an zwei mit Zinnamalgam bestrichenen Lederscheiben R, dem sogenannten R e i b z e u g, reiben. Das Reibzeug ist durch Schrauben ziemlich fest

gegen die Glasscheibe angedrückt. Dadurch wird also auf der Scheibe fortwährend positive Elektrizität erzeugt, auf dem Reibzeug negative. Um nun die positive Elektrizität der Glasscheibe auf einen isolierten Leiter C zu übertragen, benutzt man folgende Anordnung, deren Begründung sofort gegeben werden wird. Man verbindet mit dem Leiter C (den man den einen K o n d u k t o r der Elektrisiermaschine nennt, M ist der andere) zwei Holzringe, welche die Scheibe zwischen sich hindurch rotieren lassen, und welche mit feinen Spitzen, Nähnadeln, der Scheibe gegenüber besetzt sind. Diese Spitzen saugen, wie wir sofort erklären werden, die positive Elektrizität aus der Glasscheibe fortwährend in sich, und da sie in leitender Verbindung mit dem Konduktor C stehen, so verbreitet sich die Elektrizität von ihnen aus auf den Konduktor. Der isolierte Leiter C wird also positiv geladen und zwar um so stärker, je länger man die Glasscheibe dreht. Zugleich steht das Reibzeug R in Verbindung mit einem anderen Leiter M, und auf diesem verbreitet sich die negative Elektrizität. Gewöhnlich aber verbindet man diesen Leiter mit der Erde, so daß seine Elektrizität zur Erde abgeleitet ist. An dem Reibzeug ist noch ein nach oben gebogener Ebonitstab befestigt, an welchem zwei Stücke Seidenzeug hängen, die von dem Reibzeug an bis beinahe zu den Saugspitzen sich an die Glasscheibe anhängen. Dadurch wird ein Ausgleich der beiden Elektrizitäten vermieden und die Maschine wird daher wirksamer.

So haben wir also ein einfaches Mittel, um dem Leiter C positive und dem Leiter M negative Elektrizität in großem Betrag zuzuführen.

Wie aber verteilen sich diese zugeführten Ladungen auf dem Leiter? Wir haben gesehen, daß ein Leiter die Eigenschaft hat, daß in ihm der elektrische Zustand nicht an einem einzigen Punkte oder an einigen wenigen Stellen bleiben kann, sondern daß er sich sofort über den ganzen Leiter verbreitet, wenn er an e i n e m Punkte erregt ist.

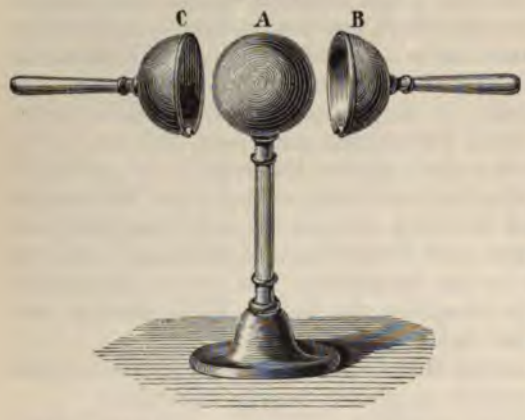
Teilt man daher einem Leiter an einer Stelle eine gewisse Menge Elektrizität mit, so muß diese zunächst wegen ihrer absolut leichten Beweglichkeit auf dem Leiter sich verschieben. Denn die einzelnen elektrischen Teilchen der Ladung suchen sich gegenseitig so weit als möglich abzustoßen und dieser gegenseitigen Abstoßung folgt die Elektrizität so lange, bis die ganze Ladung nur an der Oberfläche des Leiters ist, wo sie durch den angrenzenden Isolator verhindert wird, weiter den gegenseitigen Abstoßungskräften zu folgen. Erst dann ist ein Ruhezustand, ein G l e i c h g e w i c h t s z u s t a n d erreicht. Daraus ergibt sich also der Satz:

W e n n d i e E l e k t r i z i t ä t i n e i n e m L e i t e r i m G l e i c h g e w i c h t i s t , s o k a n n s i e s i c h n u r a n d e r O b e r f l ä c h e d e s L e i t e r s b e f i n d e n . D a s I n n e r e m u ß u n e l e k t r i s c h s e i n .

F a r a d a y hat diese Folgerung durch einen großen Versuch bestätigt. Er ließ einen großen Würfel aus Kupferdraht machen, einen Würfel von mehr als 3 m Seitenlänge, in welchen also ein Mann bequem hineingehen konnte. Die Wände dieses Würfels ließ er mit Stanniolpapier, einem leitenden Körper, überziehen. Dann begab er sich selbst mit sehr empfindlichen Elektroskopen in diesen Würfel hinein, der isoliert aufgestellt war, und ließ den Würfel von außen durch eine Elektrisiermaschine sehr stark elektrisieren. Trotzdem nun auf der Oberfläche des Würfels

außerordentlich große Elektrizitätsmengen vorhanden waren, konnte er inwendig, auch an der Innenfläche des Stanniols, nicht eine Spur von Elektrizität nachweisen. Die obige Folgerung ist damit bestätigt. Es läßt sich die Richtigkeit dieses Satzes auch durch einen einfachen Versuch zeigen. Eine isolierte Metallkugel A (Fig. 4) wird stark elektrisiert und dann mit den beiden Halbkugeln B und C, die an isolierten Griffen befestigt sind, vollständig bedeckt. Dadurch bildet die Kugel mit den beiden Halbkugeln einen einzigen Leiter, und die Elektrizität kann nach unserem Satze nicht auf A bleiben, sondern muß auf die Oberfläche von B und C gehen. In der Tat, wenn man die Halbkugeln nun wieder abnimmt, zeigt sich A vollkommen unelektrisch, während B und C elektrisch sind.

Fig. 4.



Es ist also in der Tat durch den Versuch bewiesen, daß ein Leiter, wenn er im elektrischen Gleichgewicht ist, nur an seiner Oberfläche elektrisch ist. Gerade diese auffallende Eigenschaft der Leiter legt die Frage nahe, worin eigentlich die Ladung eines Körpers, speziell eines Leiters besteht. Diese Frage hat seit mehr als hundert Jahren viele und die besten Köpfe beschäftigt und erst seit wenigen Jahren ist man nach vielfachem Schwanken zu einer einfachen und widerspruchslosen Auffassung gelangt. Man nimmt nämlich jetzt an, und viele der im folgenden zu besprechenden Erscheinungen weisen darauf hin, daß die beiden Elektrizitäten wirklich zwei besondere Stoffe sind, zwei sehr feine Stoffe, welche, wie alle anderen Stoffe, die wir kennen, nicht zusammenhängend, sondern in einzelne Teile, Atome, geteilt sind. So wie wir von Atomen des Wasserstoffs und des Kupfers sprechen, so haben wir auch Grund, von den Atomen zweier anderer chemischer Stoffe zu sprechen, den Atomen der positiven Elektrizität und denen der negativen Elektrizität. Diese Atome der Elektrizität wollen wir vorläufig schon mit dem Namen Elektronen bezeichnen und positive und negative Elektronen unterscheiden. In den Isolatoren sind diese Elektronen mit den gewöhnlichen Molekülen in mehr oder minder fester Verbindung, dagegen in den Leitern können diese Atome, ohne Verbindung mit dem Stoff des Leiters, sich frei bewegen. Dann wird also auch auf der Oberfläche eines geladenen Leiters eine sehr dünne Schicht von Elektronen wirklich aufliegen. Nach dieser Auffassung liegt in Wirklichkeit die Elektrizität zwischen Isolator und Metall in einer für unsere Apparate unmeßbar dünnen Schicht. Das Metall des Leiters spielt dabei eine wichtige Rolle. Der Leiter bewirkt nämlich, daß an der ganzen Oberfläche sofort der elektrische Zustand entsteht, wenn er auch nur an einer Stelle erregt wurde. Durch den Leiter können sich eben die Elektronen mit der

größten Leichtigkeit verschieben, und sie sammeln sich daher an der Oberfläche an, wo sie der Isolator an der weiteren Verschiebung hindert.

Längs der ganzen Oberfläche eines geladenen Leiters haben wir also eine elektrisierte Schicht, deren einzelne Teile sich gegenseitig abzustoßen suchen. Wir können uns eine solche Schicht zweckmäßig unter dem Bilde eines dünnen Häutchens vorstellen, welches den Leiter umgibt. Eine solche Schicht verhält sich nämlich in gewisser Weise ähnlich wie ein Kautschukballon oder wie eine Seifenblase, die man aufbläst. Wie bei diesen der Druck der eingeblasenen Luft bewirkt, daß der Kautschuk oder das Seifenwasser sich ausdehnen, so bewirkt bei der Elektrizität die gegenseitige Abstoßung der Elektronen, daß sich eine dem Leiter zugeführte Ladung bis an die Oberfläche desselben ausdehnt und gewissermaßen ein elektrisches Häutchen um den Leiter bildet. So wie bei einem aufgeblasenen Kautschukballon der Kautschuk eine gewisse Spannung besitzt, nämlich eine so große, daß sie dem Druck der eingeschlossenen Luft das Gleichgewicht hält, so besitzt auch ein solches elektrisches Häutchen eine gewisse Spannung, nämlich eine solche, daß sie dem Druck der gegenseitigen Abstoßungskräfte das Gleichgewicht hält.

In der Tat müssen wir jedem elektrisierten Leiter eine gewisse S p a n n u n g oder, wie man dasselbe gelehrter ausdrückt, ein gewisses P o t e n t i a l zuschreiben, eine Spannung, die man sich eben am besten unter dem Bilde eines gespannten Häutchens klarmacht. Man kann auch leicht folgendes in Bezug auf die Größe dieser Spannung einsehen. Führt man eine und dieselbe Elektrizitätsmenge, z. B. 1 Mikrocoulomb, einmal einer kleinen, dann einer großen Metallkugel zu, so muß die Spannung der elektrischen Schicht beidemal verschieden sein. Und zwar muß sie bei der großen Kugel kleiner sein als bei der kleinen. Denn da die Spannung dem Druck der Abstoßungskräfte das Gleichgewicht halten muß, da aber diese Abstoßungskräfte bei der großen Kugel wegen der größeren Entfernung der Teilchen voneinander kleiner sind als bei der kleinen Kugel, so ist auch die Spannung der elektrisierten Schicht bei der großen Kugel kleiner als bei der kleinen.

Allgemein werden wir also sagen müssen, daß jeder Leiter, dem man eine gewisse Elektrizitätsmenge zugeführt hat, eine gewisse Spannung besitzt, und daß diese Spannung abhängt außer von der zugeführten Elektrizitätsmenge von der Form und Größe des Leiters. Für einen und denselben Leiter, z. B. eine Kugel, wird die Spannung natürlich wachsen, wenn die zugeführte Elektrizitätsmenge wächst. Denn führe ich einer und derselben leitenden Kugel einmal 1 Mikrocoulomb, das andere Mal 10 Mikrocoulomb zu, so sind die Drucke infolge der Abstoßungskräfte im zweiten Fall zehnmal so groß wie im ersten, weil eben größere Elektrizitätsmengen sich abstoßen, und daher ist auch die Spannung der Kugel bei der größeren Ladung größer als bei der kleineren.

Wir können uns dies wieder durch eine Analogie leicht klarmachen. Wenn man in ein allseitig geschlossenes Gefäß, z. B. in eine Glaskugel, ein Gas hineinbringt, so wird das Gas einen Druck auf die Wände des Gefäßes ausüben und selbst auch unter diesem Drucke stehen. Je mehr Gas wir in das Gefäß bringen, um so größer ist der Druck des Gases. Was nun bei dem gasgefüllten Körper der Druck ist, ist bei dem mit Elektrizität

geladenen Leiter die Spannung. Bei einem gaserfüllten Gefäß wächst der Druck, wenn die Menge des Gases zunimmt, und wird der Druck geringer, wenn die Menge abnimmt. Ebenso wird bei einem elektrischen Leiter die Spannung größer, wenn man ihn mit mehr Elektrizität ladet, und geringer, wenn man ihm weniger Elektrizität zuführt. Wenn man ferner eine und dieselbe Menge Gas, z. B. 1 g, in Gefäße von verschiedener Form und Größe bringt, so wird der Druck jedesmal ein anderer sein. Nämlich in dem Gefäß mit größerem Inhalt, mit größerer Kapazität, wird dieselbe Menge Gas einen kleineren Druck ausüben, in einem Gefäße mit kleinerem Inhalt einen größeren. Das Verhältnis zwischen der Menge des eingeführten Gases und dem dadurch erzeugten Druck hängt also ganz allein ab von dem Inhalt, von der Kapazität des Gefäßes. Ganz ebenso ist es bei einem elektrischen Leiter. Das Verhältnis der Elektrizitätsmenge, die auf dem Leiter liegt, zu der Spannung, die dadurch hervorgebracht ist, hängt nur ab von der Gestalt und Größe des Leiters, welcher mit dieser Elektrizität geladen ist. Man nennt dieses Verhältnis auch hier, wie in unserem Beispiel, die K a p a z i t ä t des Leiters. Die Kapazität eines Leiters gibt also an, in welchem Verhältnis stets die auf dem Leiter liegende Elektrizitätsmenge zu ihrer Spannung steht. Es ist die

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Spannung}}.$$

Die Kapazität eines Leiters bei der Ladung mit Elektrizität entspricht also dem Volumen eines Gefäßes bei der Füllung mit Gas.

Man kann bei vielen Körpern die Kapazität aus ihren Dimensionen berechnen, bei allen sie leicht durch Versuche bestimmen, wie wir später sehen werden. Kennt man nun die Kapazität eines Leiters und weiß man, wie viel Elektrizität er enthält, so weiß man auch, welches seine Spannung ist, denn es ist seine

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Kapazität}}.$$

Und umgekehrt, kennt man die Kapazität und die Spannung, so weiß man auch, wie groß die Elektrizitätsmenge auf dem Körper ist, denn es ist seine

$$\text{Elektrizitätsmenge} = \text{Kapazität} \times \text{Spannung}.$$

Um aber die so neu eingeführten Größen, Spannung und Kapazität, nicht bloß im allgemeinen, sondern gründlich zu verstehen, müssen wir sie auch in bestimmten Maßen ausdrücken, und wir müssen untersuchen, wie wir das tun können.

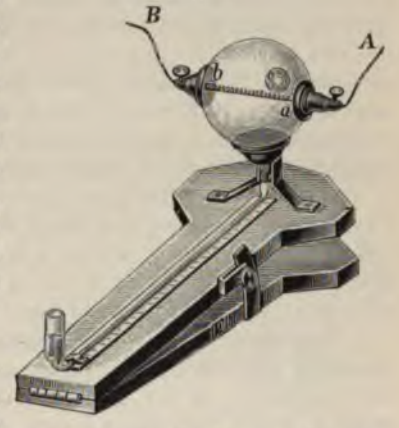
Zwei verschiedene geladene Leiter haben im allgemeinen verschiedene Spannung. Verbinden wir die beiden Leiter nun durch einen Draht, so bilden sie jetzt nur einen einzigen zusammenhängenden Leiter, und da dieser im ganzen e i n e bestimmte Spannung haben muß, so muß sich der Spannungsunterschied zwischen ihnen ausgleichen. Und in der Tat findet eine andere Anordnung der Ladung, der Elektronen, an der Oberfläche statt, so daß jetzt wieder der ganze zusammenhängende Leiter überall dieselbe Spannung hat, es bewegt sich, wie man sagt, die Elektrizität längs des

Drahtes von dem einen Leiter zum anderen, bis überall dieselbe Spannung herrscht. Diese Betrachtung können wir auch umkehren:

Stets, wenn wir beobachten, daß die Elektrizität sich von einem Leiter A zu einem Leiter B bewegt, drücken wir das so aus, daß wir sagen, die beiden Leiter A und B haben einen Spannungsunterschied (oder eine Potentialdifferenz), die Spannung ist nicht auf dem Leiter A dieselbe wie auf B, sondern sie ist auf A größer als auf B.

Bei dieser Bewegung der Elektrizität zwischen zwei Leitern von verschiedener Spannung leisten aber die elektrischen Kräfte stets eine gewisse Arbeit. Es entsteht nämlich, wie sich leicht beweisen läßt, in dem Draht, durch welchen die Elektrizität sich bewegt, um den Ausgleich der Spannungen zu erzielen, immer eine gewisse Wärmemenge, wodurch der Draht erwärmt wird und da die Wärme nach den allgemeinen Begriffen der Physik nur eine bestimmte Form der Arbeit ist, so können wir allgemein sagen, daß bei der Bewegung der Elektrizität von einem Leiter A mit höherer Spannung zu einem Leiter B mit niederer Spannung die elektrischen Kräfte immer eine gewisse Arbeit leisten. Daß dabei der Draht wirklich erwärmt wird, ist durch vielfache Beobachtungen erwiesen. Um es deutlich zu zeigen, kann man sich am besten eines Apparates bedienen, der von Rieß angegeben ist und den man ein Lufthermometer nennt. Man bringt nämlich einen spiralförmig gewundenen Platindraht a b (Fig. 5) in eine hohle Glaskugel, die in ein enges Rohr ausläuft, in welchem etwas Wasser sich befindet. Die Enden des Spiraldrahtes, die durch die Glaskugel eingeschmolzen hindurchgehen, verbindet man nun durch Drähte mit den beiden Leitern A und B von verschiedener Spannung, die sich ausgleichen soll, z. B. mit den beiden Konduktoren unserer Elektrisiermaschine, von denen der eine positive, der andere negative Spannung besitzt. Dann bildet also der Platindraht die Verbindung zwischen den Konduktoren, und durch ihn bewegt sich beim Ausgleich der Spannungen die Elektrizität. Der Draht wird nun in der Tat dabei wärmer, wie man daraus erkennt, daß die Luft in der Kugel sich ausdehnt und das Wasser in der engen Röhre vor sich hinschiebt.

Fig. 5.



Durch diesen Versuch ist also vorläufig bewiesen, daß bei dem Übergang der Elektrizität von einem Leiter höherer Spannung zu einem solchen von geringerer Spannung Arbeit geleistet wird, und das können wir dazu benutzen, um zunächst für den Unterschied der Spannungen der beiden Leiter ein Maß zu finden und festzusetzen. Wir können uns dabei an ein bekanntes Beispiel bei der Bewegung von Wasser halten. Wenn eine bestimmte Wassermenge (z. B. 10 kg) aus einer Höhe A (z. B. 30 m) unter

dem Einfluß der Erdanziehung herunterfällt bis zu einer Höhe B (z. B. 12 m) über dem Erdboden, so ist die Arbeit, welche die Erdschwere dabei leistet, gleich dem Produkt aus der Wassermenge und dem Höhenunterschied, also hier gleich 180 Kilogrammeter.

Ganz ebenso wollen wir jetzt feststellen: Wenn eine gewisse Elektrizitätsmenge (z. B. 10 Coulomb) von einem geladenen Leiter A nach einem Leiter B sich bewegt, also unter dem Einfluß der elektrischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte, so ist die Arbeit, welche bei dieser Bewegung von den Kräften geleistet wird, gleich dem Produkt aus der Elektrizitätsmenge und dem Spannungsunterschied der Leiter A und B. Was also in dem Fall des Wassers der Höhenunterschied ist, das ist hier der Spannungsunterschied. Offenbar haben wir damit den Spannungsunterschied zweier Leiter A und B ganz sicher bestimmt, sobald wir nur die Arbeit messen können (etwa durch Messen der erzeugten Wärme), die nötig ist, um unsere 10 Coulomb von A nach B zu bringen. Dieser Spannungsunterschied ist nämlich gleich dem zehnten Teil der gemessenen Arbeit, weil wir eben 10 Coulomb von A nach B gebracht haben. Bringen wir nur 1 Coulomb von A nach B, so ist die dazu nötige Arbeit genau gleich dem Spannungsunterschied von A und B. Wir haben also folgende Definition:

Der Spannungsunterschied zwischen zwei geladenen Leitern A und B ist gleich der Arbeit, welche nötig ist, um 1 Coulomb von A nach B zu bringen. (Die Kräfte, welche die Elektrizitäten aufeinander ausüben, leisten diese Arbeit.)

Aus dieser Definition können wir aber auch sofort unmittelbar eine passende Einheit für den Spannungsunterschied entnehmen. Eine Arbeit wird nämlich in der Physik und Technik in Kilogrammetern (kgm) gemessen, wobei man unter 1 kgm diejenige Arbeit versteht, welche die Erdschwere leistet, wenn 1 kg unter ihrer Wirkung um 1 m herabfällt. Wir werden also zunächst auch sagen können: an zwei Leitern wird dann die Einheit des Spannungsunterschiedes vorhanden sein, wenn eine Arbeitseinheit (1 kgm) geleistet wird, um 1 Coulomb von einem Leiter zum anderen überzuführen. Diese Einheit hat man aber nicht mit einem besonderen Namen bezeichnet, sondern eine andere, bei der nicht 1 kgm, sondern nur $\frac{1}{9{,}81}$ kgm Arbeit geleistet wird, um 1 Coulomb von dem einen Leiter zum anderen überzuführen. Diese Einheit des Spannungsunterschiedes nennt man 1 Volt. Es ist also

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kgm}.$$

Das ist die Definition für 1 Volt. (Die Zahl 9,81 kommt daher, daß die Erdschwere einem Körper nicht die Beschleunigung 1, sondern die Beschleunigung 9,81 erteilt.)

Wir haben bisher den Spannungsunterschied von irgend zwei Leitern oder allgemein von irgend zwei Stellen A und B zu messen und auszudrücken gelernt.

Nun ist die Erde auch ein Leiter der Elektrizität und für alle Versuche, die wir machen können, ist die Erde als ein unendlich großer Körper

anzusehen. Daher wird jede Elektrizitätsmenge, die wir der Erde zuführen, ein Häutchen von kolossal großer Oberfläche bilden. Die Spannung (das Potential) der Erde wird also Null sein, weil der Druck, den die Elektrizitäten aufeinander ausüben, dabei wegen der großen Entfernung Null ist. Die Spannung (das Potential) der Erde setzen wir also gleich Null. Und nun haben wir auch nicht bloß für den Spannungsunterschied zweier Leiter, sondern für die Spannung jedes Leiters selbst sofort ein bestimmtes Maß.

Der Spannungsunterschied eines Leiters gegen die Erde ist nämlich, da die Spannung der Erde Null ist, direkt gleich der Spannung dieses Leiters selbst.

Auch die Spannung selbst, wie der Spannungsunterschied, hat als Einheit 1 Volt. Wenn wir also sagen, an einem Leiter herrscht die Spannung 8 Volt, so heißt das nichts anderes, als daß die elektrischen Kräfte eine Arbeit von $8 \times \frac{1}{9{,}81}$ kgm ausüben müssen, um 1 Coulomb von diesem Leiter A bis zur Erde zu bringen.

Auf diese Weise haben wir also nun ein bestimmtes Maß für Spannungen, nämlich das Volt, so wie wir früher für die Elektrizitätsmengen ein Maß in den Coulomb festgelegt haben. Wie können wir aber die Spannung eines Leiters wirklich messen? Die Ladung eines bestimmten Leiters, seine Anzahl Coulomb, steht zu der Spannung, die der Leiter besitzt, den Volt, immer in einem bestimmten Verhältnis, welches wir als die Kapazität des Leiters bezeichnet haben. Wenn wir als Leiter z. B. die Kugel mit den Goldblättchen unseres Elektroskops von S. 7 nehmen, so hat dieser Leiter eine bestimmte Kapazität. Bringen wir diese Kugel nun in Berührung mit einem großen geladenen Körper, der etwa die Spannung 1000 Volt hat, so wird sie dieselbe Spannung annehmen, wie dieser Körper, also auch 1000 Volt, und es wird infolgedessen die Ladung unserer Kugel eine bestimmte Anzahl Coulomb sein, nämlich gleich der Kapazität der Kugel mal 1000 Volt. Bringen wir die Kugel in Berührung mit einem Körper, der 2000 Volt Spannung hat, so wird die Ladung der Kugel, also auch die der Goldblättchen, die doppelte von vorher sein. Es werden daher die Goldblättchen jetzt auch stärker ausschlagen. Man sieht daraus, daß, wenn wir unser Elektroskop in Verbindung mit einem geladenen Körper bringen, die Ausschläge der Goldblättchen ein Maß geben für die Spannung, die der Körper besitzt. Wir können daher ein solches Elektroskop direkt als Spannungsmesser benutzen, wenn wir nur die Ausschläge desselben meßbar machen. Und wenn wir nur ein für allemal bestimmt haben, wie groß der Ausschlag unseres Elektroskops für 100, 200, 300 u. s. w. Volt ist, so dient uns ein solches Instrument nun immer dazu, um die Spannung eines geladenen Körpers direkt in Volt zu messen.

Ein solches Instrument, ein kalibriertes Elektroskop, welches von Exner konstruiert ist, und das vielfache Anwendung findet, zeigt Fig. 6. In einem mit Glaswänden versehenen Gehäuse steckt isoliert ein Metallstab, der oben an der Klemme A befestigt ist, und der im Gehäuse die beiden Goldblättchen B trägt. Wird A mit einem geladenen Körper in Verbindung gesetzt, so schlagen die Goldblättchen aus und ihre Divergenz wird an dem geteilten Maßstab abgelesen. Je größer der Ausschlag, um so größer ist

die Spannung des geprüften geladenen Körpers. Die beiden verschiebbaren Platten C und D dienen dazu, beim Transport des Apparates, der namentlich bei Messungen der Luftelektrizität gebraucht wird, die Goldstreifen vor Verletzungen zu schützen.

Sehr bequem sind die in Volt geeichten, sogenannten absoluten Elektrometer von Braun, von denen Fig. 7 eine Ansicht gibt. Dieselben bestehen aus einem Metallgehäuse, welches vorn entweder ganz, oder bloß so weit, daß man die Skala sehen kann, durch Glas abgeschlossen ist. In das Metallgehäuse führt isoliert hinein ein festes Metallblech M, welches oben einen Knopf A besitzt und welches innen gabelförmig aufgeschnitten ist und einen drehbaren Aluminiumzeiger Z trägt. Ist das Instrument ohne Ladung, so berühren sich Metallblech und Aluminium-

Fig. 6.

Fig. 7.

zeiger. Wird der Knopf A aber mit einem elektrischen Körper verbunden, so werden beide Teile, das feste Blech und der bewegliche Zeiger, gleichnamig geladen und stoßen sich ab. Die Größe des Ausschlags ist ein Maß für die Spannung des untersuchten Körpers. An der Skala kann man direkt die Spannung in Volt ablesen. Bei dem abgebildeten Instrument entspricht jeder Teilstrich 100 Volt. Je nach der Schwere des beweglichen Zeigers kann man die Instrumente empfindlicher und weniger empfindlich machen.

Verbindet man einen geladenen Körper, der z. B. 1000 Volt Spannung besitzt, mit einem solchen Elektrometer, so ist klar, daß die Spannung des Körpers dadurch etwas sinken muß, weil eben jetzt ein Teil seiner Elektrizität auf das Elektrometer übergegangen ist. Das Elektrometer gibt die Spannung an, nicht wie sie der freie Körper, sondern wie sie der mit dem Elektrometer verbundene Körper besitzt. Hat aber das Elektro-

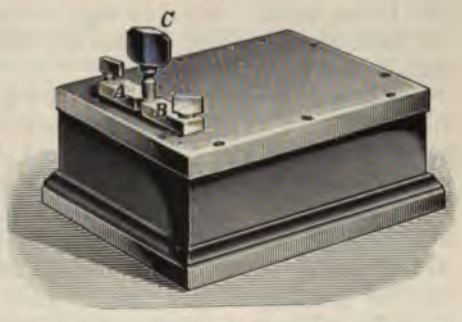
meter eine sehr kleine Kapazität, wie es die beiden eben angeführten wirklich haben, so ist die auf sie übergehende Elektrizitätsmenge sehr klein, also wird dadurch auch die Spannung des untersuchten Körpers nur sehr wenig geändert.

Wir müssen nun aber auch ein Maß, eine Einheit für die Kapazität eines Leiters festsetzen. Da die Kapazität eines Leiters stets gleich dem Verhältnis einer auf ihm liegenden Elektrizitätsmenge zu ihrer Spannung ist, so können und wollen wir festsetzen, daß derjenige Leiter die Einheit der Kapazität hat, welcher durch die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb gerade die Spannung 1 Volt bekommt. Diese Einheit der Kapazität nennt man 1 Farad. Es ist also

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}.$$

Hat man also z. B. gemessen, daß ein Leiter die Spannung 1500 Volt hat, und hat man andererseits gemessen, daß die Elektrizitätsmenge, die sich auf ihm befindet, $^1/_{200}$ Coulomb ist, so hat der Leiter die Kapazität von $^1/_{300000}$ Farad. Für gewöhnliche Zwecke ist das Farad oft unbequem groß; die Leiter, mit denen wir wirklich operieren, haben sehr viel kleinere Kapazitäten als 1 Farad. Deswegen benutzt man gewöhnlich den millionsten Teil desselben als Einheit und nennt diesen 1 Mikrofarad. Unser Leiter hätte also die Kapazität 3,33 Mikrofarad. Man stellt praktisch Leiter her, welche eine Kapazität von einer gewissen Zahl Mikrofarad haben und mit denen man dann die Kapazitäten anderer Leiter vergleichen kann.

Fig. 8.



So zeigt die Fig. 8 ein Instrument, welches 0,1 Mikrofarad Kapazität besitzt. Es besteht aus einem zusammengelegten, sehr großen Stück paraffinierten Papiers, welches auf beiden Seiten mit Stanniol beklebt ist. Das Kästchen, welches das Papier enthält, trägt auf dem Deckel zwei Metallstücke A und B, die voneinander isoliert sind. Das eine dieser Metallstücke ist mit der einen Stanniolfläche, das andere mit der anderen verbunden. Bringt man das eine Metallstück, z. B. A, mit der Erde in Verbindung, und das andere, B, mit einem Leiter, auf dem man dauernd gerade die Spannung 1 Volt aufrecht erhält (was man, wie wir sehen werden, bewirken kann), so geht auf das Stanniol eine Elektrizitätsmenge über, welche gleich

$$1 \text{ Volt} \times {}^1/_{10} \text{ Mikrofarad} = {}^1/_{10} \text{ Mikrocoulomb ist.}$$

Will man dann die geladene Metallfläche bei B wieder unelektrisch machen, so braucht man bloß den Metallstöpsel C (wie in der Figur) zwischen A und B einzustecken; dann ist B und A metallisch verbunden, und da B mit der Erde verbunden ist, so ist das ganze Stanniol zur Erde abgeleitet, also unelektrisch.

Um einen Leiter elektrisch zu laden, muß man eine gewisse Arbeit aufwenden; umsonst erhält man die Elektrizität nicht. Denn da die elektrischen Kräfte Arbeit leisten können, so ist ein elektrisierter Körper ein Sitz, eine Quelle von Energie, und Energie ist nirgends in der Natur umsonst zu haben, vielmehr muß man eine gewisse Arbeit aufwenden, um dem Körper eben diese Energie zu erteilen. Diese Arbeit läßt sich aber leicht ermitteln.

Wir wissen ja (S. 16), daß die Arbeit, welche die elektrischen Kräfte leisten müssen, um eine Anzahl von Coulomb von einer Stelle, deren Spannung eine beliebige Anzahl von Volt ist, bis zur Erde (Spannung Null) abzustoßen, daß diese Arbeit gleich dem

Produkt aus Anzahl der Coulomb und Anzahl der Volt

ist und dann in Kilogrammetern (dividiert durch 9,81) ausgedrückt wird. Gerade so groß, wie die Arbeit ist, welche die elektrischen Kräfte in diesem Falle leisten, gerade so groß ist umgekehrt die Arbeit, welche wir gegen diese Kräfte aufwenden müssen, um diese Anzahl von Coulomb auf diese Spannung zu bringen. Haben wir nun diese Elektrizitätsmenge auf den Leiter gebracht, haben wir also die bestimmte Arbeit aufgewendet, so steckt diese Arbeit jetzt gewissermaßen aufgespeichert in dem Leiter. Der Leiter besitzt, wie man sagt, elektrische Energie, welche ihn dann eben befähigt, Kräfte auf andere Elektrizitätsmengen auszuüben und Arbeit zu leisten.

Es wird also die Energie, die ein elektrischer Leiter enthält, die Arbeit, welche er leisten kann, gemessen durch das Produkt aus seiner Spannung und seiner Elektrizitätsmenge.

Drücken wir, wie bisher, die Elektrizitätsmengen in Coulomb und die Spannung in Volt aus, so ist also die Energie, die ein Leiter enthält, die Arbeit, die er leisten kann, ausgedrückt in Volt $\times$ Coulomb, wenn wir, wie es gewöhnlich geschieht, auch die Benennungen multiplizieren. Zum Beispiel ein Leiter, der die Spannung 10 000 Volt besitzt und die Elektrizitätsmenge 200 Mikrocoulomb enthält, besitzt eine Energie von 2 Volt-Coulomb, kann also eine ebenso große Arbeit leisten. (Dieser Leiter muß natürlich die Kapazität 0,02 Mikrofarad haben.) Verbindet man z. B. diesen Leiter durch einen Draht mit der Erde, so kommt er auf die Spannung Null, er wird entladen, seine ganze Energie geht durch den Draht und erzeugt, wie wir gesehen haben, in diesem Wärme. Die erzeugte Wärmemenge entspricht also dabei gerade der Arbeit von 2 Volt-Coulomb.

Nun haben wir oben (S. 16) festgesetzt, daß

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = \frac{1}{9{,}81} \text{ Kilogrammeter}$$

ist. In unserem Beispiel enthält also der Leiter $\frac{2}{9{,}81}$ = etwa 0,204 Kilogrammeter Energie, d. h. es war eine Arbeit von 0,204 Kilogrammetern nötig, um ihn zu laden, und dieselbe Arbeit kann der geladene Leiter auch wieder leisten.

Diese Beziehung zwischen den elektrischen Größen Volt und Coulomb und der mechanischen Arbeitseinheit Kilogrammeter ist deswegen wichtig,

weil sie sofort erlaubt, die Energie eines Leiters in gewöhnlichem Maß auszudrücken, wenn man nur seine Spannung in Volt und seine Elektrizitätsmenge in Coulomb gemessen hat.

Die gesamte einem Leiter zugeführte Elektrizitätsmenge befindet sich, wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, nach dem früher Gesagten auf der Oberfläche und zwar so verteilt, daß die Spannung überall auf dem Leiter dieselbe ist. Wenn das der Fall sein soll, so kann durchaus nicht auf jeder gleichgroßen Stelle der Oberfläche, z. B. auf jedem Quadratmillimeter, die gleiche Elektrizitätsmenge, die gleiche Anzahl von Elektronen, vorhanden sein. Vielmehr wird an den verschiedenen gleichgroßen Stellen der Oberfläche die Elektrizitätsmenge verschieden sein, je nach der Gestalt der Oberfläche. Man nennt die Menge der Elektrizität, welche auf der Einheit der Oberfläche, also etwa auf einem Quadratmillimeter vorhanden ist, die Dichtigkeit der Elektrizität an dieser Stelle. Man kann also sagen, auf einem beliebig geformten elektrisierten Leiter ist die Spannung zwar überall dieselbe, aber die Dichtigkeit der Elektrizität ist im allgemeinen von Punkt zu Punkt verschieden. Je kleiner die Fläche ist, auf der eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. 5 Mikrocoulomb, vorhanden ist, desto größer ist also die Dichtigkeit der Elektrizität an dieser Stelle.

Es läßt sich nun leicht einsehen und auch durch das Experiment leicht beweisen, daß, wenn ein Leiter in eine Spitze ausläuft, daß dann an dieser Spitze die Dichtigkeit der Elektrizität eine außerordentlich große ist, eine ganz bedeutend größere als an jedem anderen Punkte des Leiters. Es kann die gesamte Elektrizitätsmenge auf dem Leiter eine sehr kleine sein, trotzdem ist die Dichtigkeit der Elektrizität auf einer leitenden Spitze eine sehr große, weil eben die Flächengröße einer Spitze außerordentlich klein ist. Diese Eigenschaft der Spitzen zieht nun eine Reihe von wichtigen Folgen nach sich. Je dichter nämlich die Elektronen an der Oberfläche des Leiters beieinander liegen, desto stärker ist naturgemäß die Abstoßung zwischen ihnen. Wenn nun die Abstoßung zwischen diesen Teilchen groß genug wird, wie eben gerade an einer Spitze, so kann dieselbe den Widerstand des Isolators überwinden, und die Folge davon ist, daß die Elektronen sich von der Spitze weg nach außen bewegen müssen, namentlich wenn der angrenzende Isolator die Luft oder ein anderes Gas ist.

An einer Spitze eines geladenen Leiters werden die elektrischen Teilchen nach außen, von dem Leiter weg, getrieben.

Diese Fortbewegung der Elektronen durch die Luft ist in Wirklichkeit immer mit einer Luftströmung verbunden. Man fühlt stets einen Luftstrom, der von einer geladenen Spitze ausgeht und den man als elektrischen Wind bezeichnet. Bewegen sich aber die Elektronen fort, so folgt, daß die Ladung eines Leiters sich verringern muß, wenn man an ihn eine Spitze ansetzt. Auch dies ist der Fall, wie man leicht durch den Versuch beweisen kann. Man nehme einen isolierten Leiter, etwa den Zylinder mit abgerundeten Ecken B (Fig. 9) (an dem man sich die Spitze noch fortdenken muß) und lade ihn durch eine Elektrisiermaschine. Befestigt man an einer oder mehreren Stellen des Zylinders

Streifchen von Blattgold, so divergieren diese bei der Ladung, und die Größe ihrer Divergenz läßt die Spannung des geladenen Zylinders erkennen. Sowie man nun an den geladenen isolierten Leiter eine Spitze ansetzt, so nimmt die Divergenz der Goldblättchen sofort ab und dies beweist, daß seine Spannung geringer geworden ist, also auch seine Ladung, daß also von der Spitze die elektrischen Teilchen fortgeflogen sind.

Fig. 9.

Unsere bisherigen Betrachtungen sind aber nun durch eine neue Tatsache von weitreichendster Bedeutung zu vervollständigen, durch eine Eigenschaft der Elektrizität, die man aus dem Bisherigen nicht vermuten konnte.

Wenn man ein Goldblattelektroskop aufstellt und eine geriebene Glasstange in die Nähe des Knopfes desselben bringt, so fangen die Goldblättchen schon an zu divergieren, ehe noch der Glasstab den Knopf berührt hat. Hält man den Glasstab in einiger Entfernung von dem Knopf des Elektroskops, so gehen die Goldblättchen auseinander und bleiben so lange divergent, als der Stab in der Nähe gehalten wird. Sowie man den Glasstab fortnimmt, fallen die Goldblättchen wieder zusammen. Die Elektrizität auf dem Glasstab hat also, wie man daraus sieht, die Eigenschaft, durch ihre bloße Nähe auf leitenden Körpern den elektrischen Zustand hervorzurufen. Man bezeichnet diese Wirkung mit dem Namen Influenz. Man sagt, der elektrisierte Körper influenziere auf dem in der Nähe befindlichen Leiter Elektrizität, er erzeuge Influenzelektrizität.

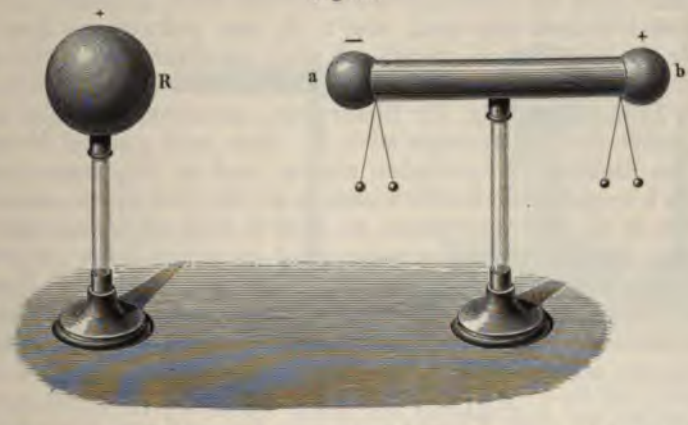
Zwei Unterschiede kann man aber sofort zwischen dem Verhalten eines influenzierten Leiters und eines durch Reibung oder Berührung elektrisierten erkennen. Erstens: Die Influenzelektrizität bleibt auf einem isolierten Leiter nur so lange, als der influenzierende Körper in der Nähe ist. Wird dieser fortgenommen oder wird ihm seine Elektrizität auf irgend eine Weise entzogen, so verschwindet auch sofort die Influenzelektrizität auf dem influenzierten Leiter. Der zweite Unterschied ist folgender: Untersucht man einen influenzierten Leiter daraufhin, von welcher Art die Elektrizität ist, die auf ihm durch Influenz entwickelt ist, so findet man, daß er nicht eine Art Elektrizität enthält, sondern daß auf seiner Oberfläche beide Arten Elektrizität getrennt vorhanden sind, die positive und die negative. Ein Teil der Oberfläche ist positiv, der andere negativ elektrisch, und zwar haben diejenigen Teile der Oberfläche, welche am nächsten an dem influenzierenden Körper sich befinden, immer die entgegengesetzte Art der Elektrizität wie dieser, während die entfernteren Teile dieselbe Art der Elektrizität enthalten. Es sei z. B. (in Fig. 10) R eine positiv elektrische Glaskugel. Bringt man in ihre Nähe den isolierten Leiter a b, so entsteht auf diesem Influenzelektrizität, und zwar wird der links liegende Teil a negativ, während der rechts liegende Teil b positiv elektrisch wird. Wenn die Kugel R negativ elektrisch wäre, so würde auch die Verteilung der Elektrizität auf a b die umgekehrte sein. Man bezeichnet die Elektrizität auf a, also auf den dem Körper R am nächsten liegenden Teilen, als Influenzelektrizität erster Art, die auf b als Influenzelektrizität zweiter

Art. Je mehr man von a aus nach der Mitte geht, desto mehr nimmt die Dichtigkeit der negativen Elektrizität ab; je mehr man von b nach der Mitte geht, desto mehr nimmt die Dichtigkeit der positiven Elektrizität ab. Die Mitte selbst ist unelektrisch. Es sieht so aus, und das ist auch die naheliegende Erklärung, als ob in dem Leiter a b beide Elektrizitäten vorhanden wären und als ob durch die Annäherung des Körpers R die ungleichnamigen Elektronen von R nach a hin angezogen, die gleichnamigen nach b hin abgestoßen worden wären.

Wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, so muß auch hier, wie stets, die Spannung auf dem ganzen Leiter a b überall dieselbe sein. Die Spannung rührt aber her teils von den Kräften, die von R ausgehen, teils von den Kräften der elektrischen Teilchen auf a b selbst.

Die beiden Arten von Influenzelektrizität auf einem isolierten Leiter verhalten sich nun durchaus verschieden. Es läßt sich nämlich die In-

Fig. 10.



fluenzelektrizität zweiter Art (die gleichnamige) zur Erde ableiten, dagegen diejenige erster Art durchaus nicht.

Legt man an das Ende b des Zylinders a b einen leitenden Draht an, der mit der Erde in Verbindung ist, so hat jetzt der ganze Zylinder die Spannung Null. Durch die Influenz des positiven Körpers R wird nun wieder die ungleichnamige negative Elektrizität scheinbar nach a hingezogen, die positive nach b und dem Draht abgestoßen. Die positive Elektrizität fließt also zur Erde ab. Hebt man nun die Verbindung mit der Erde auf, isoliert man also den Leiter wieder, so bleibt auf a b nur negative Elektrizität übrig. Man kann also die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde ableiten.

Legt man den Draht dagegen an das Ende a des Zylinders an, so ist unser Leiter auch wieder mit der Erde in Verbindung, und auch hier spielt die Erde die Rolle des entferntesten Teils, d. h. die gleichnamige Elektrizität (zweiter Art) geht zur Erde und die negative Elektrizität bleibt auf dem Leiter. Man kann also die Influenzelektrizität erster Art durchaus nicht zur Erde ableiten.

Wenn man die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde abgeleitet

hat und dann den Körper wieder isoliert, so bleibt nur die Influenzelektrizität der ersten Art übrig. Entfernt man nun den Körper R, so kann sich diese nicht mehr mit der entgegengesetzten Elektrizität ausgleichen, da diese ja zur Erde abgeleitet ist, und der Körper bleibt also nun elektrisch (in unserem Falle negativ elektrisch). Wir haben also auf diese Weise ein Mittel erlangt, einem Leiter durch Influenz bleibend Elektrizität einer Art mitzuteilen. Wir berühren ihn mit dem (nassen) Finger, während wir ihn influenzieren. Dadurch wird die Elektrizität zweiter Art (die gleichnamige) zur Erde abgeleitet. Nehmen wir dann den Finger weg, so bleibt die ungleichnamige Elektrizität auf dem Leiter und sie bleibt auch auf ihm nach der Entfernung des influenzierenden Körpers.

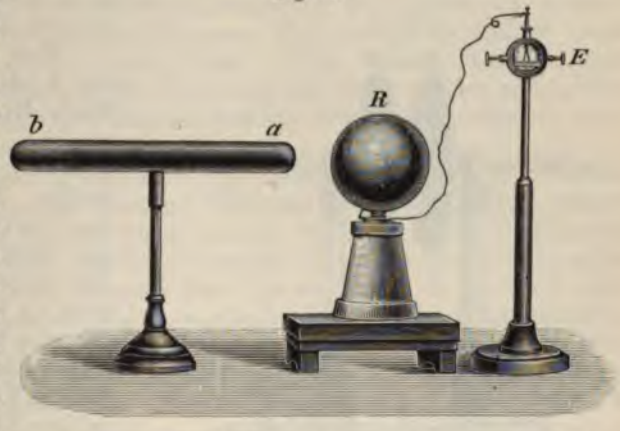
Wir müssen aber die Verhältnisse noch etwas eingehender untersuchen, die sich bei der Influenzwirkung ergeben. Wir hatten bisher angenommen, daß der influenzierende Körper R ein elektrischer Isolator ist, eine Glaskugel z. B., auf welcher die Elektrizität sich nicht verschieben kann. Nimmt man aber als influenzierenden Körper einen geladenen Leiter, der natürlich isoliert sein muß, also z. B. eine elektrisierte Metallkugel, so ist der Vorgang, der nun stattfinden wird, ein etwas verwickelterer, aber auch noch leicht zu übersehen. Die geladene Metallkugel R influenziert auf dem Zylinder a b (Fig. 10) Elektrizität, sie zieht die ungleichnamige nach a, stößt die gleichnamige nach b. Aber auch auf der Metallkugel R muß die Elektrizität verschoben werden, muß sie sich anders verteilen. Die von a b ausgehenden Kräfte wirken ja auf die Elektrizität an der Oberfläche von R ein und verschieben sie, und es muß schließlich eine solche Anordnung der Elektrizität eintreten, daß an jedem Punkt, sowohl von R wie von a b, sich alle Kräfte das Gleichgewicht halten. Erst dann ist das Gleichgewicht der Elektrizität eingetreten. Es wird dadurch auch an den einzelnen Teilen der Oberfläche von R die Dichtigkeit nicht mehr dieselbe sein wie früher, sondern eine andere. Durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers wird also die Dichtigkeit der Elektrizität an jedem Punkte des influenzierenden Leiters geändert. Wir können aber auch sofort noch einen viel wichtigeren Schluß ziehen. Wir können nämlich schließen, daß durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers, und namentlich wenn dieser zur Erde abgeleitet ist, die Spannung von R weit kleiner werden muß, als sie ursprünglich war. Denn die Spannung von R (in Volt) ist ja gleich der Arbeit, welche nötig ist, um ein Coulomb (eine positive Elektrizitätseinheit) auf die Kugel R (diese sei positiv elektrisch) zu bringen, von einer Stelle aus, wo die Spannung Null ist, und zwar entgegen den abstoßenden Kräften, die von R ausgehen. Hier in unserem Fall ist aber in der Nähe von R der influenzierte Körper, der zur Erde abgeleitet ist und daher negative Elektrizität enthält. Die Kräfte, die diese negative Elektrizität auf unser Coulomb ausübt, sind aber anziehende, sie ziehen das Coulomb von selbst heran und die Arbeit, die wir aufwenden müssen, um die Kräfte von R zu überwinden, ist also geringer, ein Teil der ganzen Arbeit wird von dem influenzierten Körper übernommen. Es ist also eine viel geringere Arbeit nötig, um 1 Coulomb auf den Körper R zu bringen, d. h. die Spannung der Kugel R ist unter sonst gleichen Umständen kleiner,

wenn der influenzierte und abgeleitete Körper in der Nähe ist.

Also: Wenn einem geladenen Leiter ein anderer Leiter in die Nähe gebracht wird, der zur Erde abgeleitet ist, so verringert sich die Spannung des ersten bedeutend.

Wir können uns davon leicht durch das Experiment überzeugen. Wir verbinden unsere Kugel R (Fig. 11), die der guten Isolation halber auf einen Paraffinklotz gelegt ist, mit einem Exnerschen Elektroskop E und laden die Kugel etwa durch eine Elektrisiermaschine. Das Elektroskop zeigt uns die vorhandene Spannung, sagen wir 1500 Volt, an. Ohne etwas zu ändern, stellen wir nun bloß den Leiter a b, zunächst isoliert, in die Nähe der Kugel. Unser Elektroskop zeigt sofort, daß jetzt bloß noch eine Spannung von 1300 Volt auf der Kugel R herrscht. Und nun verbinden wir unseren Leiter a b dadurch, daß wir den Finger anlegen, mit der Erde. Sofort gehen die Goldblättchen des Elektroskops zurück und bleiben auf etwa 600 Volt stehen, ein Beweis, wie erheblich die Spannung unserer Kugel durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers gesunken ist.

Fig. 11.

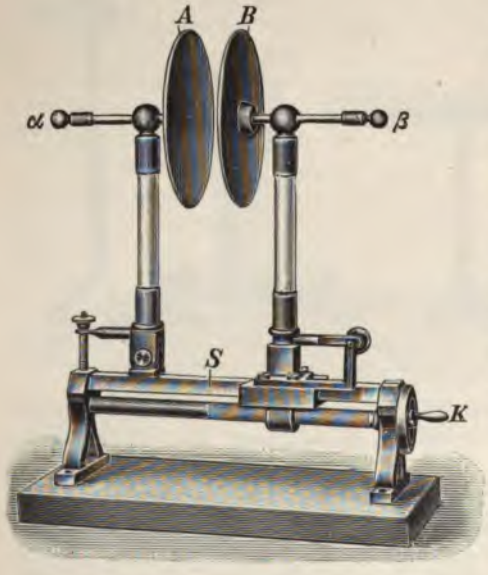


Unsere Kugel R hat dieselbe Elektrizitätsmenge behalten, es ist ihr nichts zugeführt und nichts entzogen worden. Aber wir sehen jetzt, daß durch die bloße Anwesenheit des influenzierten und mit der Erde verbundenen Körpers ihre Spannung geringer geworden ist. Das Verhältnis zwischen der Elektrizitätsmenge eines Leiters und seiner Spannung nannten wir aber die Kapazität des Leiters. Dieses Verhältnis ist also nun größer geworden, da die Spannung kleiner wurde, d. h. durch die bloße Anwesenheit eines influenzierten und abgeleiteten Körpers wird die Kapazität eines Leiters bedeutend vergrößert. Daraus folgt, daß man unserem Leiter jetzt mehr Elektrizität zuführen kann als früher, bis er dieselbe Spannung hat. Er kann also bei derselben Spannung wie früher jetzt stärker geladen sein.

Diese Möglichkeit, die Kapazität und dadurch die Ladung eines Leiters zu vergrößern, ist von großer Wichtigkeit. Man hat schon im 18. Jahrhundert einen Apparat konstruiert, den Ansammlungsapparat oder Kondensator, welcher in Fig. 12 abgebildet ist. Er besteht aus zwei Metallplatten A und B, die auf Glassäulen befestigt und daher

isoliert sind und die einander gerade gegenüberstehen. Die Platte A mit ihrer Säule ist fest, die Platte B mit ihrer Säule kann durch Drehung der Kurbel K verschoben und in beliebigen Abstand von A gebracht werden. Ist die Platte B sehr weit von der Platte A und verbindet man die Platte A mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine, so wird A so lange geladen, bis ihre Spannung gleich der des Konduktors der Maschine ist. Weiter läßt sich die Ladung nicht treiben. Bringt man aber der Platte A jetzt die zur Erde abgeleitete Platte B nahe gegenüber, so haben wir gesehen, daß dadurch die Spannung von A erheblich kleiner wird, als sie war. Infolgedessen geht jetzt von der Elektrisiermaschine wieder neue Elektrizität auf A über, bis die Spannung von A wieder gleich der der Elektrizitätsquelle geworden ist. Es hat also A viel mehr Elektrizität aufgenommen, als es ohne die Anwesenheit von B hätte aufnehmen können.

Fig. 12.



Man nennt die Platte A die Kollektorplatte, die Platte B die Kondensatorplatte. Die Klemmen α und β dienen zum Einschalten der Drähte, durch welche A mit der Elektrisiermaschine, B mit der Erde verbunden werden. Der abgebildete Kondensator wird als Kohlrauschscher Kondensator bezeichnet. Die Kollektorplatte hat also eine viel größere Kapazität, sie kann eine größere Elektrizitätsmenge aufnehmen, wenn die zur Erde abgeleitete Kondensatorplatte ihr nahe gegenübersteht, als wenn sie entfernt steht. Man bezeichnet die Kapazität der Kollektorplatte, wenn die Kondensatorplatte ihr gegenübersteht und zur Erde abgeleitet ist, kurz als die Kapazität des Kondensators. Die Kapazität eines Kondensators ist also das Verhältnis zwischen der Elektrizitätsmenge, die auf der Kollektorplatte liegt, zu der Spannung derselben, falls die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ist.

Die Kapazität eines Kondensators hängt von verschiedenen Umständen ab. Sie hängt ab von der Größe und auch von der Form der leitenden Körper, also in unserem Falle der Platten; sie hängt wesentlich davon ab, in welcher Entfernung die beiden Platten einander gegenüberstehen. Die Kapazität ist um so größer, je geringer diese Entfernung ist. Endlich hängt die Kapazität auch wesentlich davon ab, welches das isolierende Medium zwischen den beiden Platten ist. Wir haben stillschweigend angenommen, daß zwischen den beiden Platten sich Luft befindet. Ist aber das isolierende Medium nicht Luft, sondern ein

anderer Isolator, Glas, Kautschuk, Schwefel u. s. f., so ist die Kapazität eine andere und zwar immer eine größere. Es beruht das auf der Entdeckung von Faraday, von der wir schon oben S. 10 gesprochen haben. Da nämlich die Coulombschen Anziehungs- und Abstoßungskräfte in jedem isolierenden Körper kleiner sind als in Luft, so ist auch die Spannung eines geladenen Leiters, wenn er etwa von Petroleum umgeben ist, bei gleicher Ladung, kleiner, als wenn er von Luft umgeben ist. Da nun aber die Kapazität allgemein gleich der Ladung dividiert durch die Spannung ist, so sieht man, daß die Kapazität eines Leiters, wenn er von Petroleum umgeben ist, größer ist, als wenn er von Luft umgeben ist, und zwar so vielmal größer, als die Coulombsche Kraft in Petroleum kleiner ist als in Luft. Dasselbe gilt also auch für die Kapazität eines Kondensators. Die Isolatoren spielen, und das ist von besonderer Wichtigkeit, eine wesentliche Rolle bei der elektrischen Influenz. Man bezeichnet deshalb einen Isolator auch als Dielektrikum. Diese beiden Bezeichnungen bedeuten dasselbe. Das eine Mal hebt man nur die Fähigkeit zu isolieren hervor, das andere Mal die Fähigkeit, auf die elektrische Verteilung einen Einfluß zu üben.

Wenn man einen und denselben Kondensator nimmt (d. h. dieselben Metallflächen in demselben Abstand läßt) und den Zwischenraum einmal mit Luft, das zweite Mal mit einem anderen Dielektrikum, z. B. Glimmer oder Glas oder Schwefel, ausfüllt, so ist die Kapazität des Kondensators das zweite Mal größer als das erste Mal. Ist sie dann z. B. 8- oder 6- oder 3,9mal so groß wie das erste Mal, so sagt man, das betreffende Dielektrikum besitzt die Dielektrizitätskonstante 8 oder 6 oder 3,9. Man versteht also unter der Dielektrizitätskonstante eines Dielektrikums das Verhältnis der Kapazität eines Kondensators, wenn er das betreffende Dielektrikum als Zwischenschicht enthält, zu der Kapazität desselben Kondensators, wenn er Luft als Zwischenschicht enthält. So hat man experimentell folgende Dielektrizitätskonstanten gefunden·

Dielektrizitätskonstanten.

Paraffin	2,3	Glimmer	8,0
Kautschuk	2,9	Glas (je nach der Sorte)	6—10
Ebonit	2,6	Öle („ „ „ „)	2—5
Schwefel	3,9	Gase	1

Auf die hervorragende theoretische Wichtigkeit dieser dielektrischen Eigenschaften der Isolatoren kommen wir bald zurück.

Die festen Isolatoren, Glas, Kautschuk, Schellack u. s. w., haben, als Zwischenschicht in einem Kondensator gebraucht, noch einen weiteren Vorteil. An den beiden einander gegenüberstehenden Flächen eines Kondensators befinden sich ja Elektrizitäten von entgegengesetzter Art und zwar in großer Dichte. Je dichter nun die Elektrizität an einer Stelle ist, desto größer ist, wie wir wissen, die Kraft, welche sie nach außen treibt. Die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten auf den beiden Platten können daher den Widerstand der Luft überwinden und sich in Form eines elektrischen Funkens ausgleichen. Die Anhäufung der Elektrizität wird dadurch illusorisch gemacht. Ist aber das Dielektrikum ein fester Körper, wie Glas, so ist der Widerstand, der dem Ausgleich der Elektrizitäten entgegengesetzt

wird, ein viel größerer; diese können sich im allgemeinen nicht gewaltsam ausgleichen, sondern bleiben auf den beiden Leiterflächen. Will man deshalb einen Ansammlungsapparat stark laden, so muß man als isolierende Zwischenschicht, als Dielektrikum, einen festen Körper, Paraffin, Papier, Glimmer oder Glas, nehmen.

Die zweckmäßigste und am meisten benutzte Form für einen Ansammlungsapparat ist die der Leydener Flasche, deren Prinzip nach dem Gesagten sofort zu übersehen ist. Sie besteht (Fig. 13) aus einer Flasche aus Glas in Form der gewöhnlichen Einlegegläser. Dieses Glas ist außen und innen bis zu etwa $^2/_3$ seiner Höhe mit Stanniolpapier, einem leitenden Körper, beklebt. Diese beiden Stanniolpapierplatten, die man die Belegungen der Flasche nennt, vertreten die Stellen unserer Platten A und B in Fig. 12. Das Glas ist das Dielektrikum. Man braucht nun bloß die eine Belegung als Kollektorplatte mit einer Elektrisiermaschine, die andere mit der Erde in leitende Verbindung zu setzen, um auf der Kollektorplatte sehr viel Elektrizität anzuhäufen, sie sehr stark zu laden, viel stärker, als es möglich wäre, wenn diese Platte allein stände.

Fig. 13.

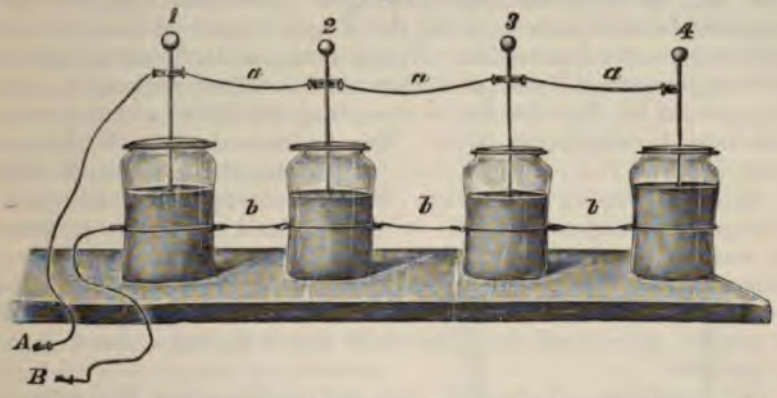
Um diese Verbindung herzustellen, trägt die Glasflasche einen Holzdeckel, durch welchen ein Metallstab mit einem Knopf gesteckt ist. Der Metallstab berührt die innere Belegung. An der äußeren Belegung dient ein herumgelegter Draht mit Öse zur Verbindung. Indem man den Knopf dieses Stabes mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in leitende Verbindung setzt, etwa indem man eine Drahtschnur mit angelöteten Metallklemmen an beiden befestigt, und ebenso die äußere Belegung mit der Erde verbindet, kann man die Flasche durch Drehen der Elektrisiermaschine sehr stark laden. Hat man den Knopf der Flasche mit dem positiven Konduktor der Elektrisiermaschine in Verbindung gesetzt, so wird die innere Belegung positiv elektrisch, die äußere negativ elektrisch, da die Influenzelektrizität der zweiten Art zur Erde abgeleitet wird. Ist der Knopf mit dem negativen Konduktor in Verbindung, so sind die Ladungen der beiden Belegungen die entgegengesetzten.

Die Elektrizitätsmenge, die eine Flasche aufnehmen kann, ist um so größer, je größer ihre Kapazität ist, und die Kapazität einer Flasche ist eine um so größere, je größer ihre Belegungen und je geringer die Entfernung der Stanniolplatten ist, also je dünner das Glas der Flasche ist.

Um also sehr viel Elektrizität anzusammeln, muß man das Glas sehr dünn — wobei man aber wegen der Zerbrechlichkeit praktisch bald zu einer Grenze kommt — und die Belegungen sehr groß machen. Das letztere kann man aber einfacher erreichen, wenn man nicht eine, sondern mehrere Flaschen nimmt. Wenn man eine Reihe von Leydener Flaschen nimmt und

alle inneren Belegungen miteinander verbindet, während man alle äußeren zur Erde ableitet, so entspricht dieses System einer einzigen Flasche mit sehr großen Belegungen. Alle inneren Stanniolplatten bilden zusammen eine große Stanniolplatte, ebenso alle äußeren. Man kann also, was eigentlich selbstverständlich ist, in einer Batterie von 4 Leydener Flaschen,

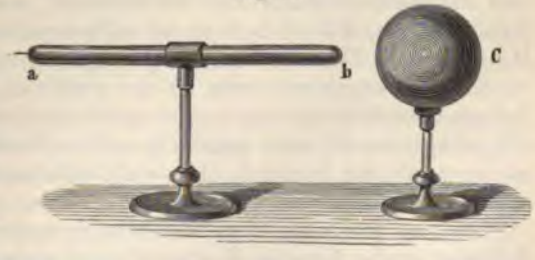
Fig. 14.



deren innere Belegungen alle leitend verbunden sind, 4mal so viel Elektrizität anhäufen als in einer einzigen. Eine solche Batterie von 4 Flaschen zeigt Fig. 14. Die äußeren Belegungen sind durch Metallschnüre b b, die inneren durch Metallschnüre a a . . je miteinander verbunden. Die Drahtschnur A wird zur Elektrisiermaschine geführt, die Drahtschnur B zur Erde, indem man sie etwa mit einem Gasrohr oder Wasserleitungsrohr des Hauses verbindet.

Der oben (S. 19) beschriebene Apparat, welcher $^1/_{10}$ Mikrofarad enthielt, ist auch nichts anderes als ein Kondensator. Die beiden Stanniolflächen sind die Belegungen, das mit Paraffin getränkte Papier ist die dielektrische (isolierende) Zwischenschicht. Für exakte Messungen nimmt man nicht Papier, sondern Glimmer als dielektrische Zwischenschicht.

Fig. 15.



Zum Verständnis einiger Vorrichtungen, die im folgenden besprochen werden sollen, müssen wir nun die Wirkung einer Spitze an einem influenzierten Leiter untersuchen. Enthält ein influenzierter Leiter a b (Fig. 15) eine Spitze an der Stelle a, welche von dem influenzierenden Körper C abgewendet ist, so wird auf der Spitze die Influenzelektrizität zweiter Art erregt, und da die Dichtigkeit auf einer Spitze, wie oben ausgeführt, außerordentlich groß ist, strömen die elektrischen Teilchen dort von der Spitze fort. Der Leiter a b behält also die Influenzelektrizität der ersten Art.

Ebenso hat, wenn die Spitze an der Stelle b angebracht ist, an welcher sich die Influenzelektrizität der ersten Art sammelt, an ihr diese Elektrizität die größte Dichtigkeit. Sie strömt daher aus und es bleibt auf a b nur Influenzelektrizität der zweiten Art (die gleichnamige) übrig. Zugleich aber wird auch auf der Kugel C die Verteilung der Elektrizität eine andere, und zwar wird die Dichtigkeit am größten an derjenigen Stelle der Kugel, welche der Spitze gerade gegenüberliegt. Diese starke Erhöhung der Dichtigkeit bewirkt aber auch an der Kugel, ebenso wie an der Spitze, ein Ausströmen der Elektrizität. Nimmt man nun die Spitze aus der Nähe von C fort, so enthält C weniger Elektrizität als früher, während a b gleichnamig geladen ist. Es sieht also so aus, als ob die Spitze aus dem Leiter C Elektrizität herausgesaugt hätte. Man bezeichnet diese Wirkung der Spitzen auch als Saugwirkung, wobei aber natürlich an ein Saugen gar nicht zu denken ist. Diese Wirkung der Spitzen wurde bei der Reibungselektrisiermaschine, die wir oben beschrieben haben, benutzt. Dort war der Konduktor der Maschine mit einem Ring verbunden, an welchem Spitzen der rotierenden Glasscheibe gegenüberstanden. Durch diese Spitzen wird der Konduktor mit der Influenzelektrizität derselben Art geladen, welche auf der Glasscheibe durch Reiben entwickelt wird, mit positiver.

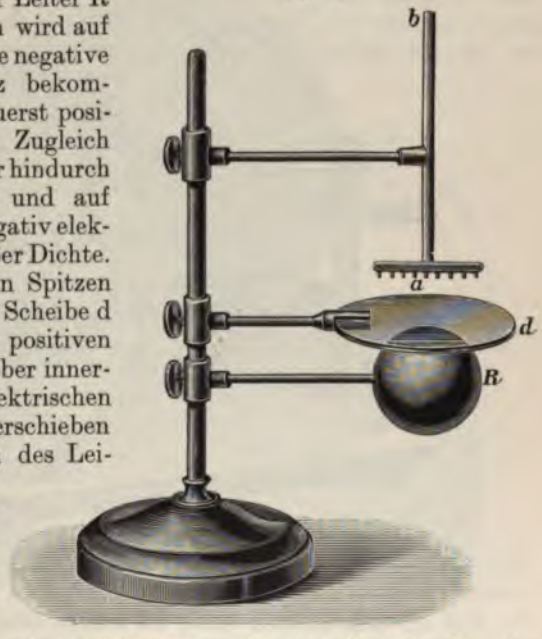
Die angeführten Tatsachen über die dielektrischen Wirkungen der Isolatoren lassen sich am leichtesten durch die Vorstellung zusammenfassen, daß jedes kleinste Teilchen eines Dielektrikums, jedes Molekül desselben, stets eine gewisse positive und negative Ladung, aber getrennt, besitze. Jedes Molekül, welches ja mindestens aus zwei Bestandteilen, Atomen oder Atomkomplexen, zusammengesetzt ist, enthält etwa an dem einen dieser beiden Atome ein positives, an dem anderen ein negatives Elektron (S. 12). Jedes Molekül ist danach ein polarer Körper, indem es zwei, sich entgegengesetzt verhaltende Ladungen, Pole, besitzt. Diese Ladungen sind infolge der Kräfte der körperlichen Materie in einem gewissen Abstand, der sich durch geeignete Einwirkungen auch vergrößern oder verringern läßt. Die Verbindungslinie der beiden Pole können wir als die dielektrische Achse des Moleküls bezeichnen. Der Einfluß des Dielektrikums auf die Influenz, etwa auf die Kapazität eines Kondensators, läßt sich dann so auffassen, daß die positiven Atome der Moleküle des Dielektrikums mehr zu der negativen Platte hingezogen werden, die negativen mehr zu der positiven, wodurch die dielektrischen Achsen aller Moleküle mehr oder minder gedreht werden und die Moleküle alle sich in mehr oder minder parallele Richtungen einstellen, während sie im normalen Zustand, ohne daß Influenz stattfindet, alle wirr durcheinander liegen.

Ebenso wie man eine Maschine konstruieren konnte, welche durch Reibung große Mengen Elektrizität entwickeln konnte, ebenso lag der Gedanke nahe, eine Maschine zu konstruieren, die durch Influenz Elektrizität in großen Mengen erzeugt oder, wie wir besser sagen, positive und negative Ladungen in großen Mengen trennt. Denn die Ladungen sind nach der ausgesprochenen Ansicht schon vorhanden, der Vorgang der Elektrisierung besteht nur in einer Trennung der positiven und negativen Elektronen. Solche Maschinen, Influenzmaschinen, wurden

von Holtz und von Töpler in äußerst sinnreicher, aber verschiedener Weise konstruiert. Die Wirkungsweise dieser Maschinen ist zum Teil recht kompliziert, sie beruht darauf, daß Ursache und Wirkung sich bei ihnen fortwährend verstärken, wodurch die Maschinen zu einer sehr großen Leistungsfähigkeit kommen.

Um das Spiel der Maschinen zu verstehen, müssen wir untersuchen, welche Vorgänge stattfinden, wenn ein geladener Körper R (Fig. 16) zugleich auf einen Isolator, eine Glasscheibe, d, und auf einen hinter dieser stehenden Leiter a b, der mit Spitzen versehen ist, wirkt. Es wird sich zeigen, daß der Isolator dadurch auf beiden Seiten mit derselben Elektrizität, und zwar mit ungleichnamiger, geladen wird. Es enthalte der Leiter R positive Elektrizität. Dann wird auf der Scheibe d die untere Seite negative Elektrizität durch Influenz bekommen, die obere Seite wird zuerst positive Elektrizität enthalten. Zugleich wird auch durch den Isolator hindurch der Leiter a b influenziert und auf den Spitzen a erscheinen negativ elektrische Teilchen in sehr großer Dichte. Diese strömen nun von den Spitzen weg auf die obere Seite der Scheibe d und gleichen sich mit der positiven Elektrizität in d aus. Da aber innerhalb des Isolators die elektrischen Moleküle sich schwerer verschieben können wie die Elektronen des Leiters, so überwiegt die negative Elektrizität aus den Spitzen und es wird dadurch auch die obere Seite der Glasscheibe mit negativer Elektrizität geladen.

Fig. 16.

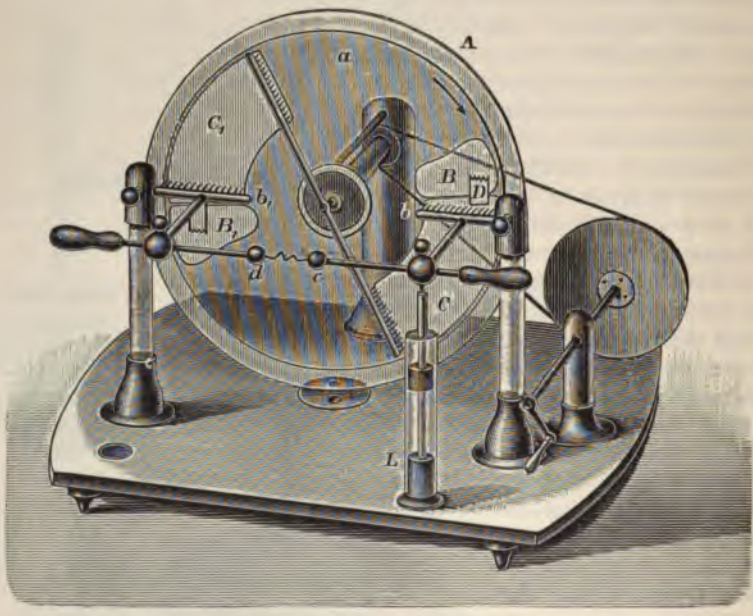


In der Tat enthalten also beide Seiten der Scheibe dieselbe Art der Elektrizität und zwar die entgegengesetzte wie der influenzierende Körper.

Dies wird bei der Influenzmaschine von Holtz benutzt, welche in Fig. 17 abgebildet ist. Die Maschine enthält zwei gefirnißte Glasscheiben, eine feste, A, und eine drehbare, a, welche nahe beieinander aufgestellt sind. Aus der festen Scheibe (in der Figur ist es die hintere, größere) sind an zwei einander gegenüberliegenden Stellen, B und B_1, Ausschnitte gemacht. An diese Ausschnitte anschließend, sind auf der Hinterseite der festen Scheibe Papiere geklebt, C und C_1, in Form von Sektoren mit etwa 60° Zentriwinkel. Diese nennt man die Belegungen. Auf die Vorderseite der festen Scheibe sind auch Papierstreifen, D, geklebt, die mit den Belegungen der Hinterseite in Verbindung sind. Zugleich laufen diese Belegungen der Vorderseite in mehrere mit Stanniol überzogene stumpfe Spitzen aus, welche etwas nach vorn, der drehbaren Scheibe zu,

gebogen sind. Diese Spitzen befinden sich ungefähr in der Mitte der Ausschnitte und stehen der Hinterseite der beweglichen Scheibe gegenüber. Die bewegliche Scheibe a hat keine Ausschnitte und keine Belegungen. Der Vorderseite der beweglichen Scheibe stehen zwei mit Spitzen versehene Leiterkämme, b und b_1, gegenüber, welche voneinander und vom Boden isoliert, je in eine Kugel auslaufen. Durch diese Kugeln hindurch ist je eine bewegliche Metallstange gesteckt, die ebenfalls in kleine Kugeln, c und d, auslaufen. Die verschiebbaren Stangen werden zuerst zusammengeschoben, so daß ihre Endkugeln sich berühren.

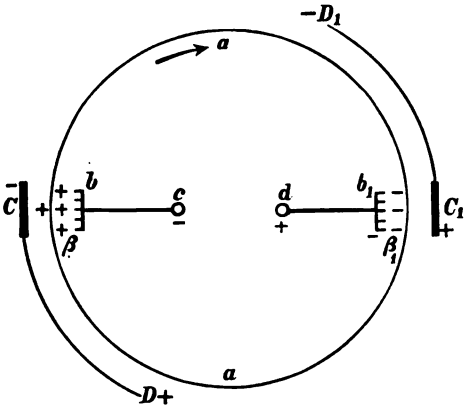
Fig. 17.



Um die Maschine in Gang zu setzen, wird nun dem einen hintersten Papierbeleg etwas Elektrizität mitgeteilt, indem man ihn z. B. mit einem geriebenen Ebonitstab berührt. Dann entwickeln sich die Elektrizitäten so, wie es am besten aus der Fig. 18 erkannt werden kann, in der die Buchstaben dieselbe Bedeutung haben wie in Fig. 17. In Fig. 18 denken wir uns die bewegliche Scheibe als Zylinder, dessen Durchschnitt der Kreis a a sei. Außerhalb dieses Zylinders seien die Papierbelege C und C_1 mit ihren Stanniolspitzen D und D_1. Innen stehen diesem Zylinder die Metallkämme b und b_1 mit ihren Kugeln c und d gegenüber, die wir erst zusammengeschoben annehmen wollen. Macht man den Papierbeleg C durch Berührung mit einem geriebenen Ebonitstab negativ, so wird die bewegliche Scheibe, wie wir wissen, auf beiden Seiten positiv elektrisch. Zugleich geht die negative Elektrizität von b über c und d nach b_1. Von b_1 strömt sie auf die eine Seite der beweglichen Glasscheibe; zugleich wird aber auch die gegenüberliegende Papierspitze influenziert, und zwar so, daß auch von dieser negative Elektrizität auf die Glasscheibe strömt. Es

ist also an dem ersten Papierbeleg C die bewegliche Scheibe auf beiden Seiten positiv, an dem anderen C_1 negativ elektrisch. Nun wird die Scheibe gedreht. Dann wiederholt sich bei der ersten halben Umdrehung derselbe Vorgang an allen Stellen der Glasscheibe, so daß auf ihr eine positiv elektrische und eine negativ elektrische Hälfte entsteht. Sowie aber die positiv elektrische Hälfte an die andere Spitze D_1 kommt, findet folgendes statt. Die Papierspitze sowohl wie die Metallspitzen saugen die positive Eektrizität aus der Glasscheibe ein. Es fließt dann also die positive Elektrizität von b_1 durch d und c zu b und zugleich die negative von b durch c, d zu b_1. Diese entgegengesetzt fließenden entgegengesetzten Elektrizitäten verstärken sich also bei jeder Umdrehung. Bleiben die Kugeln c und d in Berührung, so gleichen sich diese entgegengesetzten Elektrizitäten ohne weiteres aus. Werden sie aber voneinander getrennt, so sammelt sich auf der einen positive, auf der anderen negative Elektrizität an und es gehen, wie wir sehen werden, Funken zwischen ihnen über. In der Figur 17 ist zugleich eine Leydener Flasche L gezeichnet, deren innere Belegung mit der einen Kugel in Verbindung ist. Man kann diese Flaschen anbringen, um die Menge der Elektrizität auf den Kugeln bei gleicher Spannung zu vergrößern.

Fig. 18.



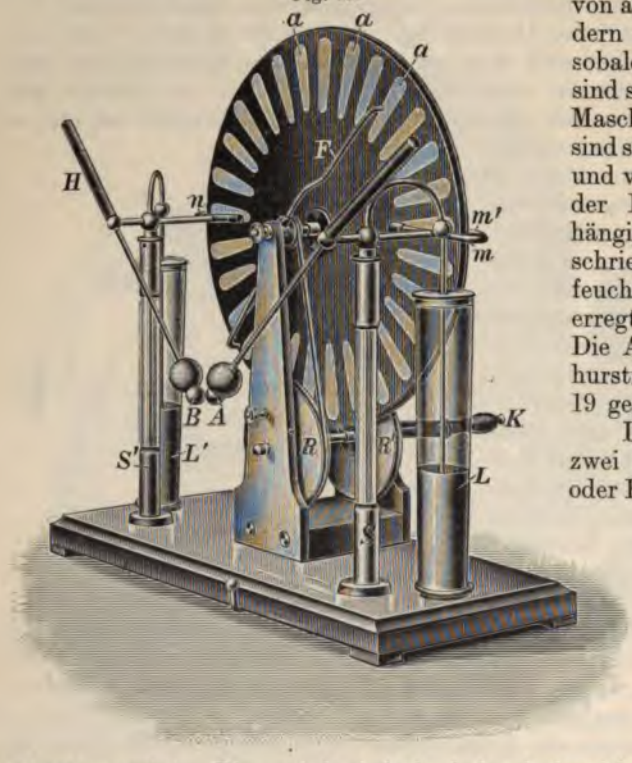
Machen wir uns nach dieser langen Beschreibung in drei Worten das Prinzip der Maschine klar. Die erregende Elektrizität bei C erzeugt auf der Scheibe in ihrer Nähe bei b ungleichnamige (erregte) Elektrizität, entfernt davon bei b_1 die gleichnamige. Dadurch wird C_1 ungleichnamig elektrisch wie C und nun bewegt sich die Scheibe bei der Rotation immer zwischen $-$ C und $+$ C_1, wobei fortwährend $+$ Elektrizität nach d und $-$ Elektrizität nach c strömt.

Die beiden Kugeln der Influenzmaschine mußten zuerst, wenn die Maschine in Tätigkeit versetzt wurde, aneinander geschoben werden, damit die Elektrizität überhaupt zwischen ihnen übergehen kann. Ist die Maschine aber einmal in Tätigkeit gebracht, dann wird bald die Elektrizitätsmenge und infolgedessen die Dichtigkeit der Elektrizität auf den Kugeln so groß, daß es nicht mehr nötig ist, sie zusammenzuhalten. Es findet dann von selbst, durch die Luft, ein fortwährender Übergang der Elektrizität von der positiv geladenen Kugel zur negativ geladenen statt. Wenn man die Kugeln nämlich voneinander entfernt, so daß also eine kleinere oder größere Luftschicht zwischen ihnen sich befindet, so strömen die elektrischen Teilchen vermöge ihrer großen Dichte von den Kugeln fort und transportieren ihre Ladungen durch die Luftschicht hindurch, so daß sie sich ausgleichen. Dieses Ausströmen ist mit einer sanften Lichterscheinung verbunden. Im Dunkeln sieht man von den beiden Kugeln mildleuchtende

blaue oder violette Strahlen ausgehen, und zwar in Form eines Strahlenbüschels. Man nennt dieses Licht das elektrische Büschellicht. Zugleich hört man dabei einen sausenden, zischenden Ton.

In neuerer Zeit werden die eben beschriebenen Influenzmaschinen mehr und mehr verdrängt durch eine andere Art von Influenzmaschinen, die jetzt Wimshurstmaschinen genannt werden, obwohl Wimshurst nichts Neues an diesen Maschinen geleistet hat, sondern alles Wesentliche von Holtz und Töpler schon gegeben war. Diese haben den Vorzug, daß sie keine Erregung von außen brauchen, sondern von selbst angehen, sobald man sie dreht. Es sind selbsterregende Maschinen. Außerdem sind sie auch viel einfacher und von der Feuchtigkeit der Luft nicht so abhängig wie die vorher beschriebenen, die, wenn sie feucht sind, oft gar nicht erregt werden können. Die Ansicht einer Wimshurstmaschine ist in Fig. 19 gegeben.

Fig. 19.



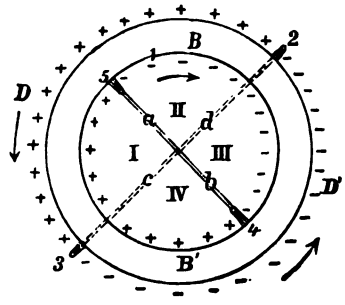
Die Maschine enthält zwei Scheiben aus Glas oder Ebonit, welche 5 mm Abstand voneinander haben. Beide Scheiben werden zugleich gedreht und zwar im entgegengesetzten Sinne, die vordere z. B. wie der Uhrzeiger, die hintere entgegengesetzt. Dies wird einfach dadurch bewirkt, daß die Schnur von den Kurbelrädern R und R′ auf die Achse der vorderen Scheibe direkt, auf die Achse der hinteren gekreuzt gelegt ist. Auf jede Scheibe sind eine Anzahl Metallsektoren a, a, a von der Form wie in der Figur aufgeklebt. Die beiden Scheiben laufen rechts und links innerhalb je einer Metallgabel m m′ und n, welche den Scheiben gegenüber mit Spitzen versehen sind. Von diesen Gabeln gehen noch Messingstangen aus, welche von den Glasfüßen S und S′ gehalten werden und welche durch die verschiebbaren Stangen in den Polkugeln A und B endigen. Endlich hat die Maschine als wesentlichen Teil noch auf jeder Seite einen Ausgleicher F (den hinteren, der senkrecht zu F steht, sieht man nicht). Dieser besteht aus einem Metallarm, dessen Enden durch weiche Pinsel aus Metalldraht gebildet sind, die auf den Sektoren a, a . . schleifen. Wird

die Maschine gedreht, so entwickelt sich sofort Elektrizität, die zwischen A und B in Funken oder Büscheln übergeht. Die Ausgleicher sind etwa um 50° gegen die Spitzenkämme geneigt. Die Spitzenkämme und die mit ihnen verbundenen Polkugeln können noch, wie in der Figur, mit Leydener Flaschen L und L′ (d. h. mit deren innerer Belegung) verbunden werden.

Der Vorgang in der Maschine wird am besten aus der schematischen Fig. 20 erkannt werden. In dieser ist die eine Scheibe mit ihren Sektoren als der innere Kreis B B′, die andere Scheibe mit ihren Sektoren als der äußere Kreis D D′ dargestellt. Der Ausgleicher am inneren Kreis mit den Pinseln ist mit a b, der am äußeren Kreis mit c d bezeichnet. Die Spitzenkämme sind vorläufig nicht gezeichnet. Die Wirkung der Maschine läßt sich vollständig erklären, wenn wir nur die Vorgänge an den Metallsektoren ins Auge fassen, diejenigen in dem Ebonit zunächst nicht berücksichtigen. Die gleichzeitige entgegengesetzte Drehung der beiden Scheiben fassen wir hier als successive Drehung bald der einen, bald der anderen Scheibe auf.

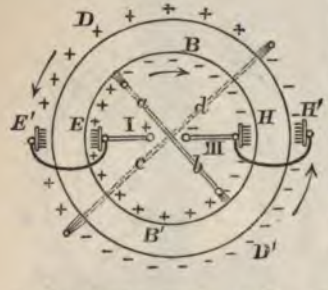
Es möge nun der Sektor 1 des inneren Kreises aus irgend einem Grunde Elektrizität, etwa negative, besitzen. Gewöhnlich hat er diese noch von dem letzten Gebrauch der Maschine her, da er isoliert ist, behalten. Der innere Kreis werde rechts herumgedreht, während der äußere zunächst stillsteht. Der Sektor 1 passiert nun eine Reihe Sektoren des äußeren Kreises, die isoliert sind, und influenziert beim Vorübergehen jedesmal zwar in ihnen die beiden Elektrizitäten, die sich aber sofort wieder vereinigen, sobald Sektor 1 an ihnen vorüber ist. Sowie aber Sektor 1 an dem Sektor 2 des äußeren Kreises vorbeipassiert, der gerade von dem Ausgleicher d c berührt wird, wird auf 2 die positive Elektrizität entwickelt und auf dem damit durch den metallischen Ausgleicher verbundenen Sektor 3 negative. Nun dreht sich aber auch der äußere Kreis. Im nächsten Moment sind also 2 und 3 nicht mehr verbunden, sondern 2 behält seine positive, 3 seine negative Elektrizität. Nun dreht sich der äußere Kreis links herum weiter. Sobald 3 gegenüber 4 kommt, influenziert es dort positive und stößt die negative Elektrizität nach 5 ab. Zugleich influenziert 2 bei 5 die negative und stößt die positive Elektrizität nach 4 ab. Das Resultat ist also, daß der Sektor 4 positiv geladen ist und 5 negativ. Nun drehen sich wieder 4 und 5, und 5 hat die Funktion wie im Anfang 1. So geht das fort. Das Resultat ist eine Ladung der Sektoren auf der inneren und äußeren Scheibe, wie sie durch die Zeichen + + und — — angegeben ist. Man sieht, daß mitten zwischen den Ausgleichern rechts beide Scheiben negative, links positive Sektoren haben. Bringt man also da je einen Spitzenkamm an, wie es Fig. 21 zeigt, so wird der linken Kugel fortwährend positive, der rechten fortwährend negative Elektrizität zugeführt, die sich beim Auseinanderschieben der Kugeln in Form des Büschellichts ausgleichen.

Fig. 20.



Man kann übrigens sowohl bei der Holtzschen Influenzmaschine, als bei der Wimshurstmaschine den Ausgleich der Elektrizitäten auch in anderer Form als der des Büschellichts vor sich gehen lassen. Wenn man nämlich die beiden Kugeln zu Knöpfen zweier Leydener Flaschen macht, wie das in Fig. 17 an einer Kugel und in Fig. 19 an beiden Kugeln gezeichnet ist, dann werden durch das Drehen der Influenzmaschine die beiden Flaschen und mit ihnen die Kugeln sehr stark geladen, ohne daß ein kontinuierlicher Ausgleich der Elektrizität zwischen den Kugeln stattfindet. Wenn aber diese Dichtigkeit sehr groß geworden ist, wenn auf der einen Kugel positive Elektrizität, auf der anderen negative, beide von sehr großer Dichte sich befinden, dann wird die Luft von den Elektrizitäten gewaltsam durchbrochen. Die positive Elektrizität auf dem Knopf der einen Leydener Flasche und die negative auf dem Knopf der anderen ziehen sich gewaltsam an, und es springt zwischen den beiden Knöpfen unter knatterndem Geräusch ein elektrischer Funke über. Dreht man die Influenzmaschine immer weiter, so wird wieder die eine Kugel positiv, die andere negativ elektrisch mit sehr großer Dichtigkeit, und allmählich überwindet wieder die Kraft zwischen den Kugeln den Widerstand der Luft, und so springen von Zeit zu Zeit Funken zwischen den beiden Kugeln über. Nach jedem Überspringen eines Funkens sind die beiden Kugeln zum Teil entladen, indem ihre entgegengesetzten Elektrizitäten sich zum Teil ausgeglichen haben. Man nennt diesen Vorgang eine plötzliche oder disruptive Entladung.

Fig. 21.



Ganz derselbe Vorgang findet übrigens statt, wenn man nicht zwei von vornherein entgegengesetzt elektrische Leiter hat, die einander gegenüberstehen, sondern wenn man einem geladenen elektrischen Leiter einen anderen unelektrischen immer näher bringt. Auf dem unelektrischen Leiter wird Influenzelektrizität erzeugt, und wenn er nahe genug an den ersten geladenen Leiter herangekommen ist, so haben die beiden einander gegenüberliegenden Elektrizitäten, die ja von entgegengesetzter Art sind, solch große Dichtigkeiten erlangt, daß sie den Widerstand der Luft gewaltsam überwinden. Es springt also auch hier ein elektrischer Funke über. Darauf beruht es, daß, wenn man einem geladenen Leiter ein Fingergelenk nähert, ein Funke überspringt, der einen geringen stechenden Schmerz im Finger verursacht.

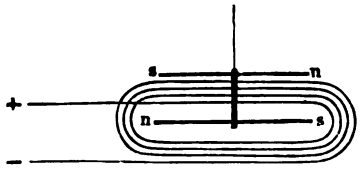
Wir sind hier schon zu einem neuen Erscheinungsgebiet der Elektrizität vorgedrungen. Unsere ersten Betrachtungen bezogen sich alle auf diejenigen Vorgänge, bei denen die Elektrizität im Gleichgewicht, in Ruhe ist. Jetzt behandeln wir bereits den Übergang der Elektrizität von einem geladenen Leiter zu einem anderen, also die Bewegung der Elektrizität. Von diesen Erscheinungen, die später ausführlich behandelt werden, sollen hier nur kurz zwei angegeben werden, die uns zunächst von Nutzen sein werden.

Wenn man die beiden Kugeln unserer Maschinen oder überhaupt zwei entgegengesetzt geladene Leiter durch einen metallischen, leiten-

den Draht miteinander verbindet, so geht der Ausgleich der Elektrizitäten nicht mehr durch die Luft vor sich, sondern durch den Draht, da ja die Elektrizität auf Metallen sich mit der allergrößten Leichtigkeit verschiebt. Es geht also von dem positiven Leiter, wo die Elektrizität höhere Spannung besitzt, die positive Elektrizität längs des Drahtes auf den negativen Leiter, wo die Spannung geringer ist, über, bis sich beide Elektrizitäten ausgeglichen haben. Es findet durch den Draht hindurch oder längs des Drahtes eine Ausgleichung der Elektrizitäten statt, was wir kurz damit bezeichnen, daß wir sagen, die Elektrizität fließe durch den Draht. Wir können uns direkt vorstellen, daß die Elektronen sich in dem Draht bewegen; die positiven nach der einen Richtung zum negativen Leiter hin, die negativen nach der anderen Richtung zum positiven Leiter hin. Durch die Drehung der Maschine wird fortwährend auf dem einen Konduktor positive, auf dem anderen negative Elektrizität erzeugt, der eine Konduktor hat also positive Spannung, der andere negative, es herrscht also zwischen ihnen ein Unterschied der Spannung, eine Spannungsdifferenz, und gerade deshalb strömen die beiden Elektrizitäten fortwährend durch den Draht. Man sagt dann, es fließt ein elektrischer Strom durch den Draht. Dieser elektrische Strom nun bringt in dem Draht und in seiner Umgebung gewisse Wirkungen hervor, von denen wir einige hier zuerst nur kurz angeben wollen.

Zunächst haben wir uns schon früher (S. 15) davon überzeugt, daß der Draht dabei wärmer wird. Aus dieser Tatsache ersehen wir, daß der Draht selbst, der Leiter, bei einem solchen Strom mitbeteiligt ist. Bei dem Gleichgewicht der Elektrizität erkannten wir, daß nur die Oberfläche der Leiter elektrisch ist; bei einem Strom aber spielt das Innere des Drahtes selbst eine Rolle, wie wir eben daraus erkennen, daß es sich erwärmt, und wie wir noch genauer aus den Gesetzen dieser Erwärmung erkennen werden.

Fig. 22.

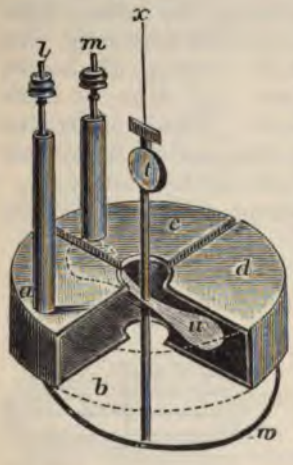


Eine zweite wichtige Wirkung des elektrischen Stromes besteht darin, daß in seiner Nähe Magnetnadeln aus ihrer Richtung abgelenkt werden. Man kann das auf folgende Weise erkennen. Man umhüllt einen Draht sorgfältig mit Kautschuk und windet ihn vielmal um einen Holzrahmen (Fig. 22). Durch ein freigelassenes Loch in diesem Holzrahmen steckt man ein Elfenbeinstäbchen, welches an einem Faden hängt und welches zwei Magnetnadeln s n und n s trägt, so daß die eine Nadel innerhalb der Windungen, die andere oberhalb sich befindet. Die beiden Nadeln haben ihre Pole in entgegengesetzter Lage, so daß dem Nordpol der einen der Südpol der anderen gerade gegenüberliegt. Ein solches System nennt man ein astatisches Nadelpaar. Sowie man nun durch diesen gewundenen Draht, den man Multiplikator nennt, den elektrischen Strom hindurchfließen läßt, indem man etwa das + Ende mit dem positiven Pol unserer Influenzmaschine verbindet, das — Ende mit dem negativen, werden die Nadeln aus ihrer Lage abgelenkt und bleiben so lange abgelenkt, als der Strom fließt. Hört der elektrische Strom auf, so kommen die Nadeln auch wieder in ihre Ruhelage. Diese magnetische Wirkung des elektrischen

Stromes, deren genauere Bestimmung uns noch beschäftigen wird, wird uns oft dazu dienen, anzuzeigen, ob überhaupt ein elektrischer Strom durch einen Draht fließt. Der elektrische Strom hat noch eine Reihe von anderen Wirkungen, die aber mit den Strömen, mit denen wir es hier zu tun haben, nur schwer nachzuweisen sind.

Überall in der Wissenschaft beruht der Fortschritt in der Erkenntnis darauf, daß man von den groben, in die Augen fallenden zu den feinen, zunächst unbemerkbaren Erscheinungen übergeht. Und das ist nur möglich, wenn man sich immer empfindlichere Meßapparate verschafft, durch die man auch sehr feine Veränderungen noch exakt messen kann. So ist auch für dieses Gebiet der elektrischen Ladungen und Spannungen der Fortschritt nur durch Apparate möglich geworden, die auch sehr geringe Elektrizitätsmengen und Spannungen sicher zu erkennen und zu messen erlauben. Apparate, welche dieses gestatten, nennt man Elektrometer. Schon ein gewöhnliches Goldblattelektroskop gibt uns ja ein Mittel, um das Vorhandensein von Elektrizität anzuzeigen und in der oben beschriebenen Exnerschen Form auch Messungen anzustellen. Ebenso erlaubt das Braunsche Elektroskop die Spannung von geladenen Körpern messend zu verfolgen. Diese Elektroskope sind aber zu wenig empfindlich. Viel empfindlichere Elektrometer hat Lord Kelvin (Sir W. Thomson) auf verschiedenfache Weise konstruiert. Das wichtigste von diesen ist das Quadrantelektrometer, welches schon außerordentlich geringe Elektrizitätsmengen und Spannungen zu messen gestattet.

Fig. 23.

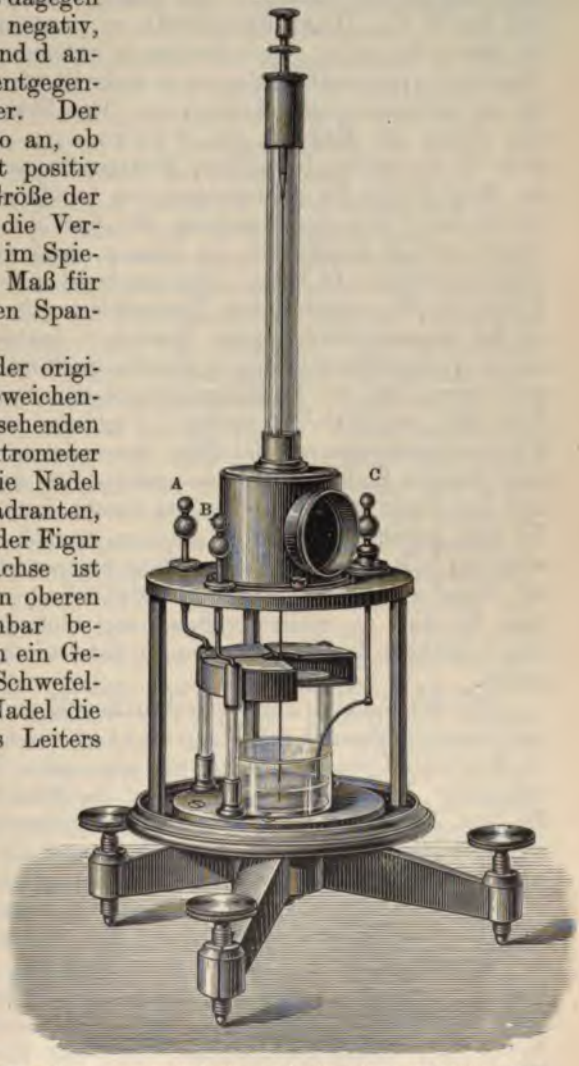


Die wesentlichen Teile des Instruments sind in Fig. 23 abgebildet. Eine Nadel u aus dünnem Aluminiumblech hängt an einem dünnen Faden x in einer Messingbüchse, welche aus vier voneinander getrennten Quadranten a, b, c, d besteht. (Der Quadrant b ist in der Figur weggelassen, damit man die Nadel u sehen kann.) Diese Quadranten stehen isoliert auf Glasfüßen. Die beiden Quadranten a und d sind permanent miteinander durch einen Draht w verbunden, und ebenso die beiden Quadranten c und b. An dem Quadranten a ist ein Metallstäbchen l, an c ein Metallstäbchen m befestigt, welche zur Zuführung der zu untersuchenden Elektrizität dienen oder auch nach Bedürfnis die Ableitung zur Erde vermitteln. Man nennt diese Stäbchen die Elektroden. Die Nadel u trägt auf ihrer Achse einen Spiegel t, in welchem das Bild einer entfernt aufgestellten Skala erscheint, welches durch ein Fernrohr beobachtet werden kann.

Um den Apparat zu benutzen, wird die Nadel u ein für allemal stark positiv geladen (auf eine hohe positive Spannung gebracht), etwa durch Verbindung mit der einen Belegung einer geladenen Leydener Flasche, und so gestellt, daß sie zwischen a c und b d liegt, und es wird dafür gesorgt, daß diese Spannung konstant erhalten bleibt. Nun wird eins der beiden Metallstäbchen, z. B. m, mit der Erde verbunden, also auf die Spannung

Null gebracht, und dadurch auch die mit ihm verbundenen Quadranten b und c. Durch das andere Metallstäbchen wird den Quadranten a und d die zu untersuchende Elektrizität mitgeteilt. Ist diese positiv, so wird die positive Nadel von a und d abgestoßen, bewegt sich also nach b und c hin, dreht sich mithin in derselben Richtung wie ein Uhrzeiger. Ist dagegen die zugeführte Elektrizität negativ, so wird die Nadel von a und d angezogen, dreht sich also entgegengesetzt wie ein Uhrzeiger. Der Sinn der Drehung gibt also an, ob die zugeführte Elektrizität positiv oder negativ ist, und die Größe der Drehung, die man durch die Verschiebung des Skalenbildes im Spiegel messen kann, gibt ein Maß für die Größe der untersuchten Spannung.

Fig. 24.



In einer etwas von der originalen Thomsonschen abweichenden, aber leichter zu übersehenden Form ist das Quadrantelektrometer in Fig. 24 abgebildet. Die Nadel schwebt zwischen den Quadranten, von denen wieder einer in der Figur weggelassen ist. Ihre Achse ist durch einen Faden an dem oberen Kopf des Apparates drehbar befestigt, unten taucht sie in ein Gefäß mit konzentrierter Schwefelsäure, durch welche der Nadel die Elektrizität vermittels des Leiters mit dem Knopf C zugeführt wird, und welche zugleich zur Dämpfung der Schwingungen der Nadel dient. Zwei gegenüberliegende Quadranten sind mit der Elektrode A verbunden, die beiden anderen mit der Elektrode B. An C legt man etwa die eine Belegung einer geladenen Leydener Flasche an, und bringt dadurch mit Hilfe der Schwefelsäure die Nadel auf die Spannung dieser Flasche.

Betrachten wir die Wirkung des Quadrantelektrometers genau, so erkennen wir, daß es, wie auch das Exnersche und Braunsche (oben S. 17 f.) Elektroskop, zunächst nicht Elektrizitätsmengen sind, welche man damit messen kann, sondern Spannungen, und daß man erst indirekt daraus

auch die Größe von Elektrizitätsmengen miteinander vergleichen kann. Denn bei der Messung wird die Nadel ein für allemal auf einer sehr hohen Spannung gehalten, indem man ihre Elektrode C mit einer Elektrizitätsquelle verbindet, die eine hohe Spannung hat. Der zu untersuchende Körper wird durch einen feinen Draht mit dem einen Quadrantenpaare, etwa mit A, verbunden. Von dem zu untersuchenden Körper strömt nun durch den Draht Elektrizität so lange auf das Quadrantenpaar A, bis dessen Spannung gleich der des zu untersuchenden Körpers ist. Dieses Quadrantenpaar enthält also um so mehr Elektrizität, je höher die Spannung des zu untersuchenden Körpers ist. Der Drehungswinkel der Nadel gibt also direkt ein Maß für die Spannung des untersuchten Körpers, nicht für die auf ihm befindliche Elektrizitätsmenge, und wir haben dadurch die Möglichkeit, die Spannungen von geladenen Körpern miteinander zu vergleichen. Um die Spannung, die man durch ein Elektrometer mißt, direkt in Volt ausdrücken zu können, muß man das Elektrometer, wie man es nennt, eichen. Das geschieht auf folgende Weise. Man hat Apparate, die sogenannten Normalelemente, deren Spannung in Volt ein für allemal durch genaue Messungen bestimmt ist. Wir werden von diesen Normalelementen im 4. Kapitel ausführlich sprechen. Hier nehmen wir voraus, daß ein Kadmiumelement eine Spannungsdifferenz an seinen Polen hat, die 1,019 Volt beträgt. Verbindet man also den einen Pol eines Kadmiumelementes mit der Erde, den anderen mit dem einen Quadrantenpaar unseres Elektrometers, so erhält dieses die Spannung von 1,019 Volt und die Nadel mit ihrem Spiegel macht dann eine bestimmte Drehung, die man durch das Fernrohr als eine Anzahl von Skalenteilen mißt. Es seien das z. B. 100 Skalenteile. Dann entspricht jeder Skalenteil Ausschlag der Nadel einer Spannung von 0,01019 Volt und man kann dann, wenn man für eine zu messende Spannung bloß die Anzahl der Skalenteile, den Ausschlag der Nadel bestimmt hat, sofort die Spannung in Volt angeben.

Wir können aber durch zweckmäßige Einrichtung von solchen Elektrometermessungen auch die Kapazität eines Leiters oder Kondensators in Mikrofarad messen, wenn wir nur einen Vergleichskondensator von bekannter Kapazität, z. B. unser $^1/_{10}$-Mikrofarad von S. 19 besitzen. Zu dem Zweck laden wir den zu untersuchenden Kondensator z. B. mit einer Elektrisiermaschine. Dann bekommt die Kollektorplatte desselben eine gewisse Spannung und enthält eine gewisse Elektrizitätsmenge, die wir zwar zunächst beide nicht kennen, von denen wir aber aus S. 26 wissen, daß die Elektrizitätsmenge auf der Kollektorplatte gleich der Kapazität des Kondensators mal seiner Spannung ist. Diese Spannung können wir aber messen, indem wir die Kollektorplatte des Kondensators mit dem Elektrometer verbinden und den Ausschlag der Nadel bestimmen. Wenn das geschehen ist, trennen wir diesen Kondensator wieder von dem Elektrometer und setzen jetzt seine Kollektorplatte mit dem Mikrofarad in Verbindung (dessen Kondensatorplatte, wie immer, zur Erde abgeleitet ist). Dann verteilt sich die Elektrizitätsmenge, die auf dem Kondensator war, jetzt auf die beiden Kollektorplatten. Die Spannung des Kondensators nimmt ab, die des Mikrofarads, die vorher Null war, nimmt zu, bis die beiden Kollektorplatten eine und dieselbe Spannung haben, die

natürlich kleiner ist als die vorher auf dem Kondensator vorhandene, während die Elektrizitätsmenge, die auf beiden Platten zusammen vorhanden ist, dieselbe ist wie früher. Die neue Spannung können wir auch wieder mit dem Elektrometer messen, und man sieht nun ein, daß die neue Spannung um so viel kleiner ist, als die erste, als die Summe der beiden Kapazitäten größer ist, als die Kapazität des ersten Kondensators allein. Dadurch ist das Verhältnis der Kapazität des Kondensators zu der des Mikrofarads bestimmt, also die Kapazität des Kondensators in Mikrofarad ausgedrückt. Wenn wir endlich von einem geladenen Leiter oder Kondensator die Kapazität in Farad gemessen haben und wenn wir durch das Elektrometer seine Spannung in Volt bestimmt haben, so wissen wir auch, wie groß die Ladung in Coulomb ist, die auf ihm liegt.

Unsere bisherigen Betrachtungen gaben im wesentlichen eine große Reihe von Erfahrungstatsachen; aber diese Erfahrungstatsachen wurden häufig in einer Weise ausgedrückt, welche noch hypothetische Elemente enthielt. So z. B. sprachen wir davon, daß man einen Leiter elektrisch laden kann, wir sprachen davon, daß die Elektrizität sich auf der Oberfläche der Leiter verteilt, und sprachen von der Dichtigkeit der Elektrizität an jedem Punkte des Leiters. In diesen Aussagen sind aber Erfahrungstatsachen mit hypothetischen Auffassungen gemischt. Denn in der Tat beobachten wir nichts weiter, als daß ein „geladener" Leiter anziehende und abstoßende Kräfte ausübt, und zwar, daß dies alle Stellen des Leiters tun. Aber von der „Elektrizität", die auf dem Leiter liegen soll, beobachten wir nichts, diese nehmen wir bloß hypothetisch an. In Wirklichkeit versuchen wir aber immer, wenn wir solche Tatsachen beobachten, uns ein Bild davon zu machen, in welcher Weise diese Tatsachen zusammenhängen; wir suchen die beobachtbaren Tatsachen zurückzuführen auf unsichtbare, nur dem geistigen Auge deutliche Vorgänge, welche einfacher sind als diese Tatsachen. So erklärt man sich die elektrischen Erscheinungen, die wir besprochen haben, durch die Annahme, daß es zwei verschiedene Stoffe gibt, die positive und negative Elektrizität, welche sich ebenso als Elementarstoffe verhalten, wie etwa der Wasserstoff und das Silber. Ebenso wie diese in Atome geteilt angenommen werden müssen, ebenso müssen auch die beiden Elektrizitäten, wie eine Reihe von späteren Erfahrungen uns lehren, in Atome eingeteilt angenommen werden, und diese Atome nennt man, wie schon oben angeführt wurde, E l e k t r o n e n. Diese Annahme muß noch ergänzt werden dadurch, daß in jedem Leiter die beiden Elektronen in praktisch unerschöpflichem Betrage vorhanden sind und durch Influenz getrennt werden können. Von diesen Elektronen nun nahmen wir nach dem Coulombschen Gesetz an, daß sie sich anziehen oder abstoßen. Wenn wir diese Eigenschaft den Elektronen an sich beilegen, so behaupten wir also, daß zwischen ihnen eine F e r n k r a f t vorhanden sei, d. h. eine Kraft, welche von einem Körper A ausgeht und an einem Körper B angreift, ohne daß in dem Zwischenraum zwischen den beiden Körpern etwas von ihr zu merken ist. Der Begriff der Fernkraft enthält aber etwas Unverständliches und Mystisches. Wenn wir beobachten, daß ein Mann an einem Tische sitzt, und daß ein Glas auf diesem Tische sich bewegt, so werden mir naturgemäß zunächst untersuchen, ob nicht eine Verbindung zwischen dem Mann und dem

Glas vorhanden ist, etwa durch Fäden oder durch einen Mechanismus in der Tischplatte, oder ob nicht die Bewegung des Glases nur eine scheinbare ist, durch optische Täuschung hervorgerufen. Wenn wir nun auch nichts derartiges finden können, so werden wir, falls wir nicht etwa zum Spiritismus neigen, unsere Überzeugung doch nicht aufgeben, daß diese Bewegung durch irgend eine reale Vermittelung erzeugt ist und nicht durch Fernkräfte, die etwa von dem Willen des Mannes ausgehen. Nicht anders ist es bei den Kräften, die wir in der Natur sehen, also auch bei den elektrischen Anziehungskräften. Sie erscheinen uns zunächst als Fernkräfte, aber die Annahme derselben kann uns nicht befriedigen, vielmehr werden wir diese Kräfte erst dann verstehen, wenn es gelingt, den Mechanismus klarzulegen, durch welchen ein Körper A auf einen Körper B wirkt. Die Einsicht, daß dies zum vollen Verständnis notwendig ist, hatte zuerst der große englische Physiker Faraday, und seine Bemühungen gingen sein ganzes Leben hindurch darauf hin, durch experimentelle Tatsachen zu zeigen, daß eine solche Vermittelung existiert und worin sie besteht. Die Auffindung der dielektrischen Eigenschaften der Körper war ein erster Erfolg in dieser Richtung. Sie zeigten ganz direkt, daß das Zwischenmedium zwischen zwei geladenen Kondensatorplatten einen wesentlichen Einfluß auf den ganzen Vorgang der Influenz besitzt. Die Anschauungen von Faraday wurden später von Maxwell weiter ausgebildet und präziser dargestellt, und man versteht heute unter der Maxwellschen Theorie der Elektrizität diejenige Theorie, welche die elektrischen Erscheinungen nicht auf Fernkräfte, sondern auf vermittelte Kräfte zurückführt. Dabei kann man immer noch festhalten, daß die Elektrizitäten wirkliche Stoffe sind, aber man muß versuchen, die Kräfte, mit denen diese aufeinander wirken, als vermittelte aufzufassen. Da die elektrischen Wirkungen zwar einerseits von der Natur der Isolatoren abhängen, andererseits aber, wie wir später sehen werden, sich durch die Isolatoren mit einer außerordentlich großen Geschwindigkeit fortpflanzen, welche ebenso groß ist wie die Geschwindigkeit des Lichts, so muß man weiter annehmen, daß zwar die körperliche Substanz der Isolatoren, die Moleküle derselben, die Träger der Elektronen sind, daß aber die Vermittelung, die Übertragung der elektrischen Wirkungen von einem Elektron zu einem anderen durch eine außerordentlich feine elastische Substanz geschieht, dieselbe, welche man auch zur Erklärung der Lichterscheinungen anzunehmen gezwungen ist, und welche man bekanntlich den Lichtäther nennt. Dieser Körper ist im ganzen Weltraum verbreitet, er ist aber auch in den Körpern selbst zwischen den Elektronen vorhanden. Bekanntlich haben die verschiedenen durchsichtigen Körper die Eigenschaft, das Licht mit verschiedener Geschwindigkeit fortzupflanzen und der sogenannte Brechungsindex eines Körpers ist um so größer, je kleiner die Geschwindigkeit des Lichtes in ihm ist. Dieser Äther ist nun nach Maxwell auch der Vermittler, der Übertrager der elektrischen Erscheinungen. In einem dielektrischen Körper sind nun nach unserer obigen Annahme (S. 30) die einzelnen Moleküle polar mit Elektronen verbunden, und bei der Fortpflanzung einer elektrischen Wirkung durch den Äther müssen alle diese Elektronen angegriffen, ihre gegenseitigen Abstände verändert werden. Daraus folgt, daß die Geschwindigkeit,

mit der elektrische Wirkungen sich durch einen Isolator fortpflanzen, um so kleiner sein wird, je mehr solche Elektronenpaare in jedem Volumen vorhanden sind, d. h. je größer die Dielektrizitätskonstante des betreffenden Isolators ist, und zwar zeigt eine genauere Beobachtung, daß die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante es ist, welche die Geschwindigkeit der Fortpflanzung elektrischer Wirkungen bedingt. Daraus ist nun zunächst sofort ein wichtiger und interessanter Schluß zu ziehen. Da die Geschwindigkeit des Lichtes um so kleiner ist, je größer der Brechungsindex ist, und die Geschwindigkeit der Elektrizität um so kleiner ist, je größer die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante ist, da aber diese beiden Geschwindigkeiten, wenn sie in demselben Äther verlaufen, dieselben sein müssen, so folgt:

Die Dielektrizitätskonstante eines Körpers ist gleich dem Quadrat des (optischen) Brechungsindex.

Diese merkwürdige Beziehung, die von Maxwell zuerst ausgesprochen wurde, heißt auch das Maxwellsche Gesetz. Es hat sich dasselbe an der Erfahrung bisher ausgezeichnet bestätigt gezeigt, wenn man nur für den Brechungsindex die richtigen Zahlen nimmt. Folgendes sind z. B. bei einigen Körpern die beobachteten Zahlen für die Dielektrizitätskonstante und für das Quadrat des Brechungsindex:

Name der Substanz	Dielektrizitätskonstante	Quadrat des Brechungsindex
Schwefel	3,97	3,89
Paraffin	2,00	2,01
Schweres Flintglas .	3,16	3,05
Petroleum	2,07	2,07
Terpentinöl	2,23	2,13

Die Kräfte, mit denen zwei elektrische Körper aufeinander nach dem Coulombschen Gesetze wirken, sind also nach dieser Theorie keine Fernkräfte, sondern hervorgebracht durch den Druck oder Zug, den die Elektronen auf den benachbarten Äther ausüben, und der sich durch den Äther fortpflanzt und so Bewegungsantriebe erzeugt. Es lassen sich also die elektrischen Erscheinungen ganz anders auffassen, als der erste Anschein es erfordert und als man es früher getan hat. Diese neuen Anschauungen führen aber, und das hat ihnen die Überlegenheit über die alten gegeben, in ihren Folgerungen zu ganz neuen Erscheinungen, die auch durch die Experimente von Hertz tatsächlich bestätigt worden sind.

2. Kapitel.

Kontaktelektrizität. Der elektrische Strom.

Lange Zeit galt es für unmöglich, Elektrizität auf andere Weise zu erzeugen als durch Reibung. Zwar konnte man mit einem einmal elektrisierten Körper auch wieder von neuem durch Influenz Elektrizität entwickeln, aber immer mußte man zuerst einen elektrisierten Körper dazu haben, und dieser ließ sich nicht anders herstellen als durch Reibung. Da war es gegen Ende des 18. Jahrhunderts, daß, durch eine zufällige Entdeckung von Galvani veranlaßt, Volta, Professor der Physik in Pavia, eine Reihe von Experimenten anstellte, welche nicht nur neue Methoden zur Hervorbringung von Elektrizität lehrten, sondern welche die gesamte Kenntnis von den Wirkungen der Elektrizität außerordentlich erweiterten. Volta zeigte zum ersten Male, daß man Körper auch ganz ohne Reibung in den elektrischen Zustand versetzen könnte, er machte zum ersten Male Experimente, in denen Elektrizitätsentwickelung durch chemische Einwirkung zweier leitender Körper aufeinander eintrat.

Der Zufall, durch den diese neue Klasse von Erscheinungen bekannt wurde, war folgender:

Galvani, Professor der Medizin in Bologna, machte im Jahre 1789 (wie eine Erzählung behauptet, war es eigentlich seine Frau) eine Beobachtung, die zunächst ganz rätselhaft erschien. Galvani hatte nämlich einen Froschschenkel an dessen Nervenenden an einem kupfernen Haken aufgehängt und diesen an einem eisernen Balkongitter befestigt. Als zufällig durch den Wind das untere Ende des Froschschenkels mit dem eisernen Geländer selbst in Berührung kam, zuckte der Froschschenkel zusammen und tat dies auch jedesmal, als Galvani nun absichtlich die Berührung mit dem Balkongitter hervorbrachte.

Dieses Experiment machte damals die Runde durch alle wissenschaftlichen Kreise Europas. Aber wie war dieser Versuch Galvanis aufzufassen? Galvani selbst ließ sich durch Voreingenommenheit täuschen, er glaubte, daß dieses Experiment die lange vermutete Lebenskraft beweise, und es gelang ihm nicht, diesen immerhin sehr verwickelten Komplex von Erscheinungen in seine einfacheren Elemente aufzulösen. Erst Volta zeigte durch eine Reihe von Versuchen, daß folgende Dinge bei diesem Versuche wesentlich zum Gelingen sind:

Erstens: Es müssen außer dem Froschschenkel zwei verschiedene Metalle vorhanden sein. Bei Galvani waren es Kupfer und Eisen, es können aber auch Zink und Kupfer, oder Zink und Platin, oder überhaupt irgend zwei verschiedene Metalle sein. Mit zwei gleichen Metallen gelingt der Versuch nicht.

Zweitens: Die drei vorhandenen Körper, der Froschschenkel und

die beiden Metalle müssen einen geschlossenen Kreis bilden, es muß das Kupfer einerseits mit dem Eisen, andererseits mit dem Froschschenkel und ebenso das Eisen einerseits mit dem Kupfer, andererseits mit dem Froschschenkel in Berührung sein, sonst gelingt der Versuch nicht.

Drittens aber, welche Rolle spielt der Froschschenkel bei diesem Experiment? Sicher ist, daß in diesem geschlossenen Kreis, gebildet aus zwei Metallen und dem Froschschenkel, etwas Ungewöhnliches vor sich geht, was sich eben durch das Zucken des Froschschenkels manifestiert. Aber hierbei liegen noch zwei Möglichkeiten vor: Entweder nämlich ist der Froschschenkel überhaupt zu dem ungewöhnlichen Vorgang notwendig — und das war die Ansicht von Galvani, welcher ja die Lebenskraft aus diesem Versuche zu ersehen glaubte — oder zweitens, der ungewöhnliche Vorgang an sich ist nicht an die organische Materie des Froschschenkels geknüpft, sondern der Froschschenkel zeigt durch seine Zuckungen nur an, daß eben etwas Merkwürdiges vor sich geht, er ist nur ein Reagenzmittel für den Vorgang, ganz wie das Blauwerden von Stärke ein Reagens auf das Vorhandensein von Jod ist. Diese zweite Ansicht erwies sich als die richtige. Nicht darauf kommt es an, daß gerade ein Froschschenkel mit den beiden Metallen in Berührung ist, sondern darauf, daß eine Flüssigkeit, wie das salzhaltige Wasser, welches in dem Froschschenkel vorhanden ist, mit den beiden verschiedenen Metallen in Berührung ist, und daß diese beiden Metalle sich selbst berühren, daß also ein geschlossener Kreis vorhanden ist, gebildet aus einer Flüssigkeit und zwei verschiedenen Metallen.

Wenn man also, so schloß Volta weiter, wie in Fig. 25, zwei Metalle, Zink (Zk) und Kupfer (Cu), in eine Flüssigkeit, z. B. verdünnte Schwefelsäure oder auch bloß in gewöhnliches Brunnenwasser stellt und wenn man das Kupfer, wie in der Figur, durch einen geraden oder gebogenen Draht A B mit dem Zink außerhalb der Flüssigkeit verbindet, so geht in diesem geschlossenen Kreis dasselbe Ungewöhnliche vor wie bei dem Galvanischen Experiment. In der Tat ist dies dieselbe Anordnung wie bei Galvani, nur daß statt Kupfer und Eisen hier Kupfer und Zink und daß statt des Froschschenkels direkt eine Flüssigkeit in einem Gefäß angewendet sind.

Fig. 25.

Was geht nun in einem solchen Kreis vor, was ist es, was die Zuckungen des Froschschenkels veranlaßt? Daß die Elektrizität hierbei in das Spiel kommt, hatte schon Galvani bei seinen ersten Versuchen erkannt, denn er konnte den Froschschenkel auch zum Zucken bringen, wenn er in seiner Nähe nur elektrische Funken durch eine Elektrisiermaschine erzeugte. Volta aber erkannte, daß in diesem geschlossenen Kreis ein Vorgang stattfinde, den wir als elektrischen Strom schon oben (S. 37) bezeichnet haben, daß nämlich durch den Draht A B dauernd sich Elektrizität bewege. Den Beweis dafür können wir dadurch erbringen, daß wir zeigen, daß wir dieselben Wirkungen, die wir oben beim Durchgang der Elektrizität durch

einen Draht vom positiven zum negativen Konduktor einer Elektrisiermaschine beobachtet haben, hier wieder finden. Die erste Wirkung bestand darin, daß der Draht dort erwärmt wurde, was wir durch das Rießsche Luftthermometer nachwiesen. Dieselbe Wirkung finden wir auch hier und zwar in viel stärkerem Maße. Wenn wir den Draht A B nur mit der Hand anfassen, so merken wir sofort, daß er wärmer ist als die Umgebung, und mit einem Thermometer, das wir anlegen, können wir das noch viel genauer kontrollieren. Zweitens wurde damals ein astatisches Nadelpaar, um welches der Draht herumgeführt war, abgelenkt, sobald die Elektrizität sich durch den Draht bewegte. Benutzen wir denselben Multiplikatordraht (S. 37) jetzt dazu, um durch ihn A und B zu verbinden, statt durch den in der Fig. 25 gezeichneten dicken Draht, so finden wir eine noch viel kräftigere Ablenkung des astatischen Nadelpaares, ja es würde hier, wie wir bald sehen werden, eine gewöhnliche einfache Magnetnadel zu diesem Versuch vollständig genügen.

Wir können also nicht zweifeln, daß in diesem Apparat, den man ein Voltasches Element nennt, ein elektrischer Strom fließt. Aber, so müssen wir fragen und so hat auch Volta gefragt, woher entsteht denn hierbei die Elektrizität und woher kommt es, daß sie nicht in Ruhe bleibt, wie auf einem geladenen Leiter, sondern daß sie sich bewegt? Vor allen Dingen wissen wir bereits, daß, wenn die Elektrizität sich von einem geladenen Leiter A zu einem anderen geladenen Leiter B bewegt, daß das nur dann geschehen kann, wenn die beiden Leiter verschiedene Spannung, einen Spannungsunterschied besitzen. Wir werden daher von selbst auf die Frage geführt, ob die beiden Metallplatten, die in die Flüssigkeit tauchen, einen solchen Spannungsunterschied wirklich zeigen, wenn sie nicht durch einen Draht verbunden sind, wenn das Element, wie man sagt, offen ist. Der Versuch ist ja leicht gemacht. Wir brauchen bloß unser Quadrantelektrometer anzuwenden. Nehmen wir also (Fig. 26) ein Glas, welches wir mit verdünnter Schwefelsäure füllen, und tauchen wir in dasselbe eine Zinkplatte z und eine Kupferplatte k; verbinden wir nun das herausstehende Ende der Zinkplatte durch einen Draht mit dem einen Quadrantenpaar unseres Quadrantelektrometers (dessen Nadel, wie stets, durch eine geladene Leydener Flasche auf hoher Spannung gehalten ist), so finden wir in der Tat, daß die Nadel einen Ausschlag von, sagen wir, 50 Teilstrichen macht, und zwar können wir uns leicht überzeugen, daß die Drehung der Nadel dabei anzeigt, daß die Zinkplatte negative Spannung hat. Machen wir denselben Versuch, indem wir nun die Kupferplatte mit demselben Quadrantenpaar verbinden, so bekommen wir einen Ausschlag der Nadel von derselben Größe, 50 Skalenteile, aber in entgegengesetzter Richtung, wodurch wir erfahren, daß das Kupfer positive Spannung besitzt.

Fig. 26.

Durch diesen Versuch ist also nachgewiesen, daß unsere beiden verschiedenen Metalle, die in die Flüssigkeit tauchen, tatsächlich einen Spannungsunterschied besitzen, einen Spannungsunterschied, der durch die Zahl 100 (50 positive weniger 50 negative Teilstriche) in unserem

willkürlichen Maß angegeben ist. Wenn wir von vornherein unser Elektrometer geeicht haben (S. 40), so können wir diesen Unterschied der Spannungen auch sofort in unseren Einheiten, in Volt, ausdrücken. Bei der hier angenommenen Größe des Ausschlages würde ein Teilstrich etwa einem hundertstel Volt entsprechen, so daß unsere Messung uns sagt: zwischen dem Kupfer und dem Zink in der Flüssigkeit herrscht ein Unterschied der Spannungen von etwa 1 Volt.

Dieser Unterschied der Spannungen der beiden Metalle, so lehrt nun die Erfahrung weiter, bleibt immer bestehen und ist immer von demselben Betrage, welche Operationen wir auch mit dem Element vornehmen.

Wenn unser Gefäß isoliert ist, d. h. wenn beide Metalle und die Flüssigkeit ohne leitende Verbindung mit der Erde oder mit anderen Elektrizitätsquellen sind, so beträgt die Spannung auf dem Kupfer $^1/_2$ Volt, die auf dem Zink — $^1/_2$ Volt, so daß ihre Differenz gleich 1 Volt ist. Ist dagegen z. B. das Zink zur Erde abgeleitet, also auf der Spannung Null, so ist die Spannung des Kupfers = 1 Volt. Ist das Kupfer zur Erde abgeleitet, also auf der Spannung Null, so zeigt das Zink die Spannung — 1 Volt. Wird andererseits das Zink z. B. mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in Verbindung gesetzt, der auf der Spannung 1000 Volt ist, so wird es ebenfalls die Spannung 1000 Volt bekommen, aber die Spannung auf dem Kupfer ist dann 1001 Volt, so daß die Differenz wieder 1 Volt ist. Also ergibt sich, daß die Spannung auf dem Kupfer hierbei unter allen Umständen immer um einen bestimmten Betrag, 1 Volt, größer ist als die auf dem Zink.

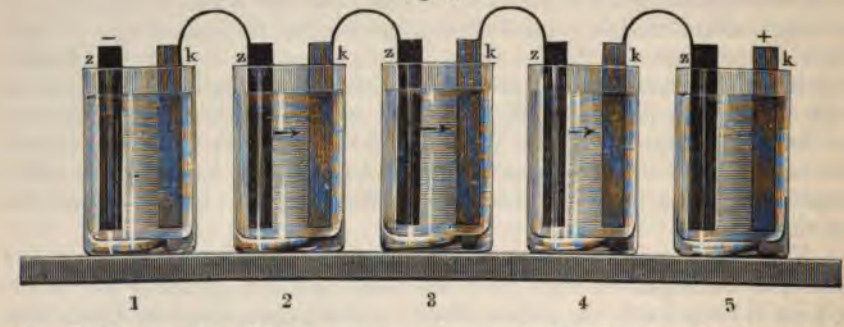
Eine Kombination wie die angewendete aus einer oder auch aus mehreren Flüssigkeiten und zwei Metallen nennt man ein *galvanisches Element*. In jedem offenen galvanischen Element haben also die beiden Metalle einen bestimmten Spannungsunterschied. Dieser hängt nur ab von der *Natur* der beiden Metalle und der Flüssigkeit, aber nicht von der Größe und Form der Metalle oder der Menge der Flüssigkeit. Man kann große Zink- und Kupferplatten in Schwefelsäure tauchen lassen, oder kleine, man erhält immer am Elektrometer denselben Spannungsunterschied. Man bezeichnet diesen bestimmten Spannungsunterschied als die *elektromotorische Kraft des Elements*. Ein jedes galvanische Element hat also eine bestimmte elektromotorische Kraft, die in Volt ausgedrückt wird.

Die Spannungen der beiden Metalle in einem Element sind also um diese bestimmte Größe verschieden, wie groß oder wie klein auch die wirklichen Werte der Spannungen gemacht werden mögen. Daraus folgt zunächst als praktisches Resultat, daß wir durch eine Kombination von mehreren Elementen den Unterschied der Spannungen an den Endgliedern beliebig erhöhen können. Stellen wir nämlich eine Reihe von Elementen her, die je einen Kupferstab und einen Zinkstab in verdünnter Schwefelsäure enthalten, und verbinden wir, wie in Fig. 27, den Kupferstab unseres ersten Glases mit dem Zinkstab des zweiten Elements und so fort, so tritt folgendes ein. Das erste Kupfer hat eine um 1 Volt höhere Spannung wie das erste Zink und dieselbe Spannung bekommen auch alle mit ihm verbundenen Körper. Also hat auch das zweite Zink eine um 1 Volt höhere Spannung als das erste. Aber das Kupfer des zweiten Systems

hat wiederum eine um 1 Volt höhere Spannung als das Zink dieses Systems, folglich hat der Kupferstab des zweiten Systems und ebenso das Zink des dritten Glases eine um 2 Volt höhere Spannung als das Zink des ersten Systems. Verbindet man also in der angegebenen Weise eine beliebige Anzahl, etwa 5 gleiche galvanische Elemente, so wird der Spannungsunterschied der Endglieder fünfmal so groß sein als in jedem einzelnen System. Fünf von unseren Elementen in der angegebenen Weise verbunden, haben also den Spannungsunterschied 5 Volt an ihren Endgliedern. Sind alle Elemente isoliert, so wird also das erste Zink die Spannung — 2,5 Volt haben, das letzte Kupfer die Spannung + 2,5 Volt. Die elektromotorische Kraft dieses Systems ist 5 Volt.

Eine Reihe von galvanischen Elementen, die so verbunden sind, daß immer das positive Metall des einen Elements mit dem negativen des nächsten durch einen Draht in leitendem Kontakt ist, nennt man

Fig. 27.



eine Kette oder Batterie, oder auch besser eine hintereinander verbundene Kette. In einer solchen Kette sind nur die beiden letzten Metalle frei, alle übrigen sind miteinander verbunden. Man nennt die beiden freien Metalle die Pole der Kette, ebenso wie man auch bei einem einzelnen Element die Enden der beiden Metalle die Pole des Elements nennt.

Woher kommt es nun aber, daß in einer solchen Kombination von zwei Metallen und einer Flüssigkeit dauernd ein bestimmter Spannungsunterschied vorhanden ist? Woher kommt die Elektrizität, die diesen Spannungsunterschied hervorbringt? Diese Frage ist zunächst nicht leicht zu beantworten. Volta nahm an, daß die bloße Berührung der Metalle und der Flüssigkeiten die Ursache dieser Elektrizitätserzeugung sei und bezeichnete sie daher als Kontaktelektrizität. Dieser Name ist geblieben, obwohl wir heute wissen, daß es nicht die bloße einflußlose Berührung ist, sondern daß es die chemischen Vorgänge, die Auflösung der Metalle in der Flüssigkeit sind, welche die Elektrizität hierbei auftreten lassen. Indes unabhängig von jeder besonderen Erklärung können wir die neue Tatsache kurz so ausdrücken, daß wir sagen, bei der Berührung eines Metalls und einer leitenden Flüssigkeit entsteht an der Berührungsfläche eine Kraft, welche auf beiden Elektrizität entwickelt und zwar auf dem Metall die entgegengesetzte wie auf der Flüssigkeit. Damit sagen wir noch gar nichts Näheres über die Natur dieser Kraft aus.

Wir nennen diese Kraft die elektrische Scheidungskraft. Die elektrische Scheidungskraft bewirkt also, daß die Spannung des Metalls und der Flüssigkeit voneinander verschieden wird. Das Metall hat in seiner ganzen Ausdehnung eine bestimmte Spannung, die Flüssigkeit hat auch in ihrer ganzen Ausdehnung eine bestimmte Spannung, welche aber von der ersten verschieden ist. Und die Erfahrung hat nun gezeigt, daß die elektrische Scheidungskraft immer so viel Elektrizität entwickelt, daß die beiden Substanzen stets denselben Spannungsunterschied (stets dieselbe Potentialdifferenz) zeigen, welche Größe und Gestalt sie auch haben mögen, und unabhängig davon, ob etwa sonst noch auf ihnen Elektrizität vorhanden ist.

Über die Größe dieses Spannungsunterschiedes zwischen einem Metall und einer Flüssigkeit hat man lange wegen der experimentellen Schwierigkeiten keine genügenden Zahlenwerte aus der Erfahrung gewinnen können. Erst zirka 100 Jahre nach Voltas Entdeckung ist man dazu gekommen, auf sichere Weise sich Kenntnisse von der Größe des erzeugten Spannungsunterschiedes zu verschaffen, der zugleich ein Maß für die Größe der entsprechenden Scheidungskraft ist.

Man bezeichnet die Scheidungskraft zwischen zwei Körpern gewöhnlich dadurch, daß man sie nebeneinander schreibt und zwischen ihnen einen vertikalen Strich macht. Es bedeutet also:

Zink | Schwefelsäure

die Scheidungskraft zwischen Zink und Schwefelsäure.

Ist die betreffende Scheidungskraft positiv, so heißt das, der vorangehende Körper bekommt höhere Spannung als der nachfolgende; ist sie negativ, so hat der vorausgehende die geringere Spannung.

Die Scheidungskraft

Schwefelsäure | Zink

hat demnach den entgegengesetzten Wert, weil die Ordnung der Körper dabei vertauscht ist.

So wurden folgende Werte für die Spannungsunterschiede, also auch für die Scheidungskräfte zwischen den folgenden Metallen und den angegebenen Flüssigkeiten gefunden. Diese Spannungsunterschiede sind schon in Volt ausgedrückt und sie sind als direkte Messungsresultate anzusehen.

Magnesium	Magnesiumsulfat	= — 1,239	Volt
Aluminium	Aluminiumsulfat	= — 1,040	„
Zink	Zinksulfat	= — 0,524	„
Kadmium	Kadmiumsulfat	= — 0,162	„
Eisen	Eisensulfat	= + 0,093	„
Kupfer	Kupfersulfat	= + 0,515	„
Quecksilber	Quecksilbersulfat	= + 0,980	„
Silber	Silbersulfat	= + 0,974	„

Diese Zahlen besagen also, daß an der Grenzfläche von Zink und Zinksulfat immer ein Spannungsunterschied von 0,524 Volt entsteht und zwar, daß das Zink dabei die niedrigere, die Flüssigkeit die höhere

Spannung besitzt. Umgekehrt hat das Kupfer in Berührung mit Kupfersulfat die höhere Spannung und zwar eine um 0,515 Volt höhere als die Flüssigkeit. Taucht eines dieser Metalle nicht in die entsprechende Sulfatlösung, sondern in Schwefelsäure, so bildet sich rein chemisch gleich in der Nähe das entsprechende Sulfat und die obigen Zahlen gelten also auch für den Fall, daß die betreffenden Metalle in Schwefelsäure gestellt werden.

Auch wenn zwei Metalle sich berühren, scheint ein solcher Spannungsunterschied zwischen ihnen zu entstehen. Doch ist dieser außerordentlich viel geringer als bei der Berührung eines Metalls und einer leitenden Flüssigkeit. Ebenso entsteht auch ein kleiner Spannungsunterschied, wenn zwei verschiedene leitende Flüssigkeiten sich berühren. Doch sind in diesen Fällen, wie man allmählich eingesehen hat, die auftretenden Scheidungskräfte so gering, daß wir uns mit ihnen im folgenden nicht beschäftigen wollen, sondern nur die bedeutenden Spannungsunterschiede zwischen den Metallen und den sie berührenden Flüssigkeiten weiter untersuchen wollen. Metalle und Flüssigkeiten, die beide die Elektrizität leiten, unterscheiden sich also dadurch voneinander, daß bei ihrer Berührung ein starker Spannungsunterschied entsteht, während ein solcher bei der Berührung von Metallen unter sich oder Flüssigkeiten unter sich kaum auftritt.

Man teilt deshalb die leitenden Körper in zwei Klassen ein: in Leiter erster Klasse und Leiter zweiter Klasse.

Die Leiter erster Klasse sind alle Metalle, ferner einige Metallsuperoxyde, z. B. Braunstein, Bleisuperoxyd, ferner einige Schwefelverbindungen, wie Bleiglanz, Schwefelkies u. s. w.

Die Leiter zweiter Klasse sind diejenigen, welche mit den Leitern erster Klasse zusammen große Spannungsunterschiede ergeben. Zu ihnen gehören die Säuren, die Lösungen von Salzen und geschmolzene Salze.

Der Spannungsunterschied, der zwischen Leitern erster und zweiter Klasse stets auftritt, hat nun sehr wesentliche Folgen.

Bringen wir nämlich nun eine Zinkplatte und eine Kupferplatte frei, d. h. nicht durch einen Draht verbunden, in verdünnte Schwefelsäure, so tritt folgendes ein. Die Zinkplatte wird durch die elektrische Scheidungskraft negativ elektrisch, bekommt also eine negative Spannung, die verdünnte Schwefelsäure bekommt eine positive Spannung und die Scheidungskraft sucht diese Verteilung immer beständig zu erhalten. In Zahlen ausgedrückt beträgt der Überschuß der Spannung der verdünnten Schwefelsäure über die des Zinks 0,524 Volt. In der verdünnten Schwefelsäure steht nun aber noch die Kupferplatte. Diese bekommt durch die Berührung mit der verdünnten Schwefelsäure ebenfalls Elektrizität, also ebenfalls einen Spannungsunterschied gegen diese und zwar wird ihre Spannung höher als die des Kupfersulfats um 0,515 Volt. Daraus folgt, daß das Kupfer so viel positive Elektrizität enthält, daß seine Spannung um 0,515 Volt höher ist als die der Säure und daß diese wieder eine um 0,524 Volt höhere Spannung hat als das Zink, so daß der Überschuß der Spannung des Kupfers über die des Zinks die Summe ist, nämlich 0,515 + 0,524 = 1,039 Volt. Dieser Unterschied ist also dasjenige, was wir die Spannungsdifferenz oder die elektro-

motorische Kraft des Voltaschen Elementes genannt haben. Wir sehen in der Tat, daß diese, wie oben angeführt, ungefähr gleich 1 Volt ist. Wir haben hierbei zwei Metalle kombiniert, welche sich gegen die Flüssigkeit verschieden verhalten. Dasselbe gilt nun auch, wenn wir etwa Zink und Kadmium in Schwefelsäure stellen würden. Die Schwefelsäure hat dabei eine um 0,524 Volt höhere Spannung als das Zink und eine um 0,162 Volt höhere Spannung als das Kadmium, also hat das Kadmium dabei eine um 0,524 weniger 0,162, d. i. um 0,362 Volt höhere Spannung als das Zink. Kadmium wird also dabei positiv elektrisch, Zink negativ, wenn das ganze Element isoliert ist. Wir können diese Resultate verallgemeinernd so aussprechen: Bringt man zwei Metalle zusammen in eine Flüssigkeit, so wird das eine Metall negativ elektrisch, das andere positiv elektrisch, und zwar bleibt immer dasjenige Metall, das durch seine eigene Scheidungskraft stärker negativ elektrisch wurde, auch in diesem Falle negativ.

Fig. 28.

Bringt man also Zink mit irgend einem anderen in der Tabelle S. 49 auf dasselbe folgenden Metall zugleich in verdünnte Schwefelsäure, so wird immer das Zink negativ elektrisch. Nur mit Magnesium und Aluminium kombiniert würde Zink positiv werden.

Da jedes Metall in Berührung mit einer Flüssigkeit elektrisch wird, so kann man auch Kombinationen derart bilden, daß nicht die beiden Metalle in einer einzigen Flüssigkeit stehen, wie wir es bis jetzt angenommen haben, sondern daß jedes Metall in eine besondere Flüssigkeit taucht, aber die Flüssigkeiten doch in leitender Verbindung sind. Auch hierbei wird das eine Metall positiv elektrisch, das andere negativ, und auch ein solches galvanisches Element hat eine ganz bestimmte elektromotorische Kraft, welche nur abhängt von der Natur seiner Metalle und seiner Flüssigkeiten. Solche Elemente, mit zwei Metallen und zwei Flüssigkeiten, werden aus später sich ergebenden Gründen besonders häufig benutzt, und wir werden deshalb einige von ihnen beschreiben. Damit die beiden Flüssigkeiten sich nicht mischen und doch in leitender Verbindung sind, wird hierbei die eine gewöhnlich in einen porösen Tonzylinder gefüllt, durch dessen Poren die Berührung zwischen den Flüssigkeiten stattfindet.

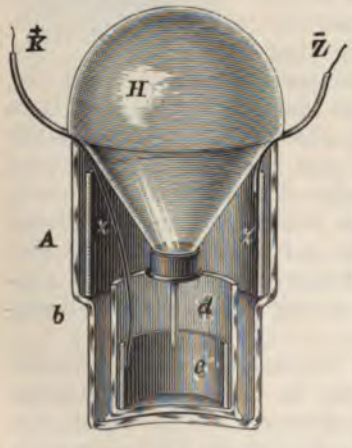
Beim Daniellschen Element (Fig. 28) sind die beiden Metalle Zink Z und Kupfer K. Das Kupfer taucht in konzentrierte Kupfervitriollösung, das Zink in verdünnte Schwefelsäure. In ein Glas wird Kupfervitriollösung gegossen und der hohle Kupferzylinder K hineingestellt. In diesen wird dann der Tonzylinder T gesetzt und dieser wird mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, in welche dann das massive Zinkstück Z eingesetzt wird. Das Zink trägt an seinem oberen Ende eine Klemmschraube m, der Kupferzylinder eine Klemmschraube s, in welche man

Drähte festklemmen kann, um leitende Verbindungen herzustellen. Diese Enden des Zinks und Kupfers nennt man speziell die Pole des Elementes. Auf dem Zinkpol wird negative Spannung herrschen, auf dem Kupferpol positive. Die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes ist

Fig. 29.

ungefähr gleich 1 Volt (genauer 1,08 bis 1,12 Volt). Will man mehrere Elemente in der vorhin beschriebenen Weise zu einer Kette verbinden, so kann man das leicht, indem man die Klemmschraube s des einen Elementes mit der Schraube m des anderen Elementes durch einen Draht verbindet. Die Fig. 29 zeigt eine solche Kette aus drei Elementen.

Fig. 30.

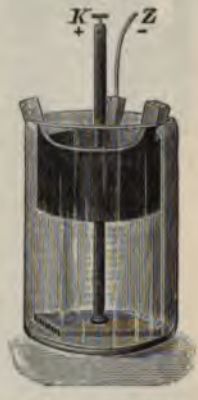


Auch bei dem Meidingerschen Ballonelement, das in der Telegraphie viel benutzt wird, und von dem Fig. 30 einen Durchschnitt gibt, werden Kupfer und Zink als Metalle benutzt, als Flüssigkeiten aber Kupfervitriollösung und Bittersalzlösung, und durch die Form des Elementes ist die Anwendung einer Tonzelle vermieden. In dem bei b etwas eingebogenen Glase A steht ein Zinkzylinder. Im Inneren von A ist ein kleines Glas d angekittet, in welchem der Kupferzylinder e sich befindet. Auf dem Rand des Glases A sitzt ein mit Kupfervitriolkristallen gefüllter Glasballon H auf, dessen unterer Teil in d hineinreicht und dort in eine kleine Glasröhre ausläuft, die durch einen Kork gesteckt ist. Das Glas A ist nun mit verdünnter Bittersalzlösung gefüllt. Die konzentrierte Kupfervitriollösung sammelt sich unten am Kupferblech und dringt nur langsam höher hinauf. Von dem Kupferblech geht ein mit einer Glasröhre oder mit Guttapercha umgebener Draht K nach oben, um als positiver Pol zu dienen. Von

dem Zinkzylinder geht ebenso ein Draht Z nach außen als negativer Pol. Die Meidinger-Elemente haben eine elektromotorische Kraft von 0,96—1 Volt.

Ein vereinfachtes Meidingersches Element ist das deutsche Telegraphenelement, welches in Fig. 31 abgebildet ist. In einem Glase liegt auf dem Boden eine Bleiplatte, an der ein Stiel mit Klemme K befestigt ist. Das Zink ist in Form eines starken gegossenen Zylinders benutzt, der mit drei Nasen auf dem Rand des Glases ruht. In eine der Nasen ist der Poldraht Z eingegossen. Der innere Rand des Glases ist oben mit Paraffin angestrichen. Als Flüssigkeiten dienen eine Bittersalzlösung für das Zink und eine Kupfervitriollösung für das Blei. Die Bleiplatte umkleidet sich nämlich beim Gebrauch der Elemente mit Kupfer und wirkt dann wie eine Kupferplatte. Die Lösung von Kupfervitriol wird unten in das Glas geschüttet, die Bittersalzlösung vorsichtig darüber geschichtet, da die erstere Lösung schwerer ist als die letztere. Wenn das Element ruhig steht, bleibt eine ziemlich scharfe Trennung der blauen Kupferlösung von der hellen Bittersalzlösung lange bestehen.

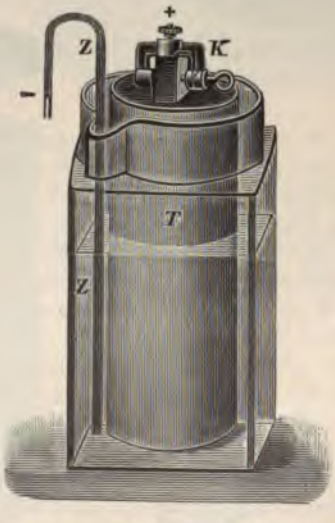
Fig. 31.



Ein anderes viel benutztes Element, das eine größere elektromotorische Kraft hat, ist das Bunsensche Element. Es ist in seiner einfachsten Form in Fig. 32 abgebildet. Das eine Metall ist auch hier wieder

Fig. 32.

Fig. 33.



Zink, das andere Metall ist durch Kohle ersetzt, welche sich ebenso wie ein Metall verhält. Das Zink taucht wieder in verdünnte Schwefelsäure, die Kohle aber in konzentrierte Salpetersäure. In das Glas wird zuerst Schwefelsäure gegossen, dann der hohle Zinkzylinder Z eingesetzt, in diesen

der Tonzylinder T, mit Salpetersäure gefüllt, und darein die Kohle K gestellt. Wieder wird der Zinkpol negativ elektrisch, der Kohlenpol positiv elektrisch. An dem Zinkzylinder befindet sich eine Klemmschraube m, an die Kohle wird eine Messingklammer s angeschraubt. Die elektromotorische Kraft eines Bunsenelements ist 1,9 Volt.

Fig. 34.

Als weiteres galvanisches Element führen wir, weil es in der Telephonie und bei elektrischen Klingeleinrichtungen sehr viel angewendet wird, das Leclanché-Element an, von dem Fig. 33 eine Ansicht gibt. Auch in diesem sind, wie bei dem Bunsenschen Element, die beiden Metalle Kohle und Zink. Aber die Kohle K, welche positiv elektrisch wird, steht in einer Tonzelle T, die mit einem Gemisch von Braunstein und Kohle gefüllt ist. Die Zinkstange Z steht in Salmiaklösung. Es ist also bei diesem Element nur eine Flüssigkeit vorhanden. Die elektromotorische Kraft des Leclanché-Elements ist ungefähr 1,49 Volt. Eine Abänderung dieses Elementes ist das Braunsteinelement, Fig. 34, bei welchem die Kohle in einem handhohen Gemisch von Kohle und Braunstein steht, während die Zinkplatte daneben nicht bis zum Boden des Gefäßes reicht. Die Flüssigkeit ist auch Salmiaklösung. Zu demselben Typus gehören die S. & H.-Beutelelemente von Siemens & Halske, die insbesondere für starke Stromentnahme für kürzere Zeit brauchbar sind, und deren einzelne Teile in Fig. 35 gezeichnet sind. In das Standglas, dessen Boden passende Erhöhungen

Fig. 35.

besitzt, wird der rechts sichtbare Zinkzylinder unverrückbar eingesetzt. In die Mitte kommt die Kohle, die mit einer aus Kohle und Braunstein bestehenden Masse umgeben und mit einem Beutel umwickelt ist. Auch sie ist am Boden und Deckel unverrückbar befestigt. Das Gefäß wird mit Salmiaklösung gefüllt. Die elektromotorische Kraft des Elementes ist 1,5 Volt. Man hat noch eine ganze Anzahl von anderen Elementen aus zwei Metallen und ein oder zwei Flüssigkeiten konstruiert. Die genannten sind aber die am meisten benutzten.

Dagegen werden auch häufig sogenannte Trockenelemente verwendet, welche für manche Zwecke sehr bequem sind. Sie lassen sich nämlich leicht transportieren und sind immer zum Gebrauch fertig, brauchen also nicht immer besonders zusammengestellt zu werden. Es wird das dadurch erreicht, daß sie nicht direkt Flüssigkeiten enthalten, sondern mit einer Masse gefüllt sind, welche mit der Flüssigkeit imprägniert ist und immer feucht bleibt. Als Metalle sind bei ihnen auch gewöhnlich Zink und Kohle verwendet. Die Füllmasse dagegen wird meistens als Geheimnis betrachtet. Ein sehr brauchbares Element dieser Art ist das von Hellesen (Fig. 36), welches die Form eines Kästchens hat und von Siemens & Halske konstruiert wird. Die Kohle, deren Pol in der Mitte aus dem Kästchen herausragt, ist mit Braunstein umgeben, der durch eine Pergamentpapierhülse gehalten wird. Das Zink, dessen Pol außen durch den gewundenen Enddraht bezeichnet wird, umgibt in Form eines durchlöcherten Zylinders die Pergamenthülse und befindet sich selbst in der mit Salmiak imprägnierten Masse. Die elektromotorische Kraft eines solchen Elementes ist 1,5 Volt.

Fig. 36.

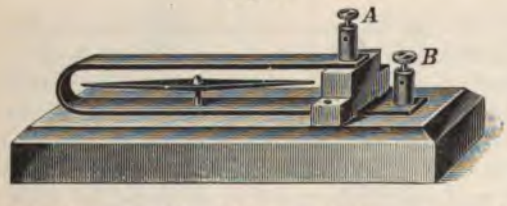
Betrachten wir nun die Vorgänge in einem beliebigen galvanischen Element, z. B. in einem Daniellschen. Auf dem Kupferpol ist positive Elektrizität und positive Spannung, auf dem Zinkpol negative Elektrizität und negative Spannung vorhanden. Diese beiden Pole verhalten sich also ganz so wie die beiden Konduktoren der Elektrisiermaschine, die wir früher betrachtet haben. Verbinden wir die beiden Pole durch einen Draht, schließen wir, wie man sagt, das Element, so fließt die Elektrizität von dem einen Pol zum anderen über. Die Elektrizitäten würden sich sofort ausgleichen und das Element würde unelektrisch werden, wenn nicht sofort durch die elektrische Scheidungskraft wieder neue Elektrizitätsmengen erzeugt würden, die sich wieder ausgleichen u. s. f. Es entsteht daher ein dauernder elektrischer Strom (galvanischer Strom). Die positive Elektrizität fließt von der höheren Spannung längs des Verbindungsdrahts der beiden Pole zur niederen Spannung. Bei dem Daniellschen Element also, bei dem auf dem Kupferpol positive Spannung herrscht, strömt die positive Elektrizität vom Kupferpol längs des Verbindungsdrahts zum Zinkpol. Die Flüssigkeit aber an dem Zink hat wegen der Scheidungskraft höhere Spannung als die in der Nähe des

Kupfers und es bewegt sich daher die positive Elektrizität von der Schwefelsäure in der Nähe des Zinks durch die mit Flüssigkeit erfüllten Poren der Tonzelle hindurch zum Kupfervitriol. Das mit diesem in Berührung stehende Kupfer hat wegen der Scheidungskraft wieder höhere Spannung als die Flüssigkeit und so bewegt sich die Elektrizität wieder vom Kupfer weiter. An den Metallen selbst findet also immer ein Sprung der Spannung statt. Dauernd aufrecht erhalten wird der Strom durch die elektrische Scheidungskraft, welche für jede ausgeglichene Elektrizitätsmenge gleich wieder neue erzeugt. Wir könnten ebensogut auch sagen, die negative Elektrizität fließt von dem Zink durch den Verbindungsdraht zum Kupfer, dann aus dem Kupfer durch die Flüssigkeiten zurück zum Zinkpol. Das ist rein Sache der Festsetzung. Man bezeichnet allgemein die Richtung, in der die positive Elektrizität fortgeführt wird, kurzweg als die Richtung des Stromes. Die Richtung des Stromes in einem Element ist in Fig. 37 dargestellt. Durch den Verbindungsdraht fließt der positive Stom vom Kupfer zum Zink und durch die Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer zurück.

Fig. 37.

Auf diese Weise ist also das Vorhandensein eines elektrischen Stromes in einem geschlossenen Element erklärt. Daß ein solcher Strom tatsächlich fließt, davon haben wir uns schon oben auf zweifache Weise überzeugt. Zunächst hatten wir gefunden, daß der Draht, durch welchen der Strom fließt, erwärmt wird. Diese Erwärmung kann hierbei aus später einleuchtenden Gründen eine sehr starke werden. Wenn man z. B. die in Fig. 27 gezeichnete Kette durch einen dünnen Draht verbindet, so kommt dieser Draht ins Glühen und schmilzt sogar weg.

Fig. 38.



Die zweite Wirkung, durch die wir erkannten, daß ein Strom in dem Draht fließt, war die Ablenkung einer Magnetnadel, um die der Strom herumgeführt wurde. Die Ströme, die wir jetzt haben, zeigen diese Wirkung in viel höherem Grade als der Strom, den wir etwa zwischen den beiden Konduktoren einer Elektrisiermaschine erhielten. Wir bedienen uns, um vorläufig nur qualitativ diese Ablenkung zu zeigen, zunächst des Apparates Fig. 38, den man ein Galvanoskop nennt.

Eine Magnetnadel befindet sich drehbar auf einer Spitze im Inneren eines umgebogenen kupfernen Streifens, der auf Holz montiert ist. An die beiden freien Enden dieses Streifens sind Klemmschrauben A und B aufgeschraubt. Sobald man nun den positiven Pol eines Elementes durch einen Draht mit A und den negativen Pol durch einen Draht mit B verbindet, so ist das Element durch diese Drähte und den Kupferstreifen

geschlossen, und man sieht nun sofort die Magnetnadel sich aus der Schleife herausdrehen und nach einigen Schwingungen, die sie ausführt, in der herausgedrehten Lage zur Ruhe kommen. Damit die Magnetnadel vor der Schließung des Elementes in der Kupferschleife steht, wie es die Figur zeigt, ist natürlich notwendig, daß man die Schleife selbst, also den Apparat Fig. 38, in die Süd-Nordrichtung stellt.

Bei dieser Verbindung der Pole des Elementes mit A und B wird der Nordpol der Magnetnadel nach vorn aus der Kupferschleife herausgedreht.

Hätten wir den Kupferpol mit B, den Zinkpol mit A verbunden, so wäre der positive Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Kupferschleife geflossen, und die Nadel wäre dann auch nach entgegengesetzter Richtung abgelenkt worden.

Während wir beim Gleichgewicht der Elektrizität gesehen haben, daß die Leiter, die Metalle, ganz frei von Elektrizität sind, daß in ihnen überhaupt keine elektrischen Kräfte wirken, und daß daher die ganze Ladung eines Leiters darin besteht, daß an seiner Oberfläche sich der elektrische Zustand ausbildet, ist jetzt bei den galvanischen Strömen die Sachlage nicht mehr so einfach. Eine ganze Reihe von Tatsachen, z. B. schon die Erwärmung der Drähte durch den Strom, zeigen, daß bei der Strömung der Elektrizität das Innere des Leiters selbst beteiligt ist. Aber wenn man früher glaubte, daß b l o ß das Innere des Leiters bei einem Strom in Frage käme, so ist das auch nicht richtig. Vielmehr wird sich zeigen, daß bei einem galvanischen Strom sowohl in den Leitern, wie in den angrenzenden Isolatoren Vorgänge auftreten, die zusammengehören und die zusammen den elektrischen Strom ausmachen.

Diese Fragen wollen wir aber erst näher untersuchen, wenn wir die quantitativen Verhältnisse der elektrischen Ströme näher kennen gelernt haben.

3. Kapitel.

Die Gesetze des elektrischen Stromes.

Ein jedes galvanische Element ist im stande, dauernd einen elektrischen Strom zu erzeugen. In der Tat ist ja die Elektrizität auf einem Leiter nur dann im Gleichgewicht, wenn auf ihm überall dieselbe Spannung vorhanden ist. Wenn aber aus irgend einem Grunde an verschiedenen Stellen des Leiters die Spannung verschieden ist, dann muß eben die positive Elektrizität stets von Stellen höherer zu Stellen niederer Spannung auf dem Leiter fließen. In jedem offenen galvanischen Element, dessen Pole also nicht verbunden sind, hat nun jede der beiden Metallplatten mit ihrem Pol eine bestimmte Spannung, aber die des einen Pols ist um eine bestimmte Größe höher als die des anderen. Sobald man daher die beiden Metalle durch einen Draht verbindet, so muß in diesem die positive Elektrizität von dem einen Metall (dem Kupfer im Daniellschen Element) zum anderen (dem Zink) fließen. Aber auch in den Flüssigkeiten des Elements selbst muß die Elektrizität fließen. Denn an jedem der beiden Metalle herrscht ja die elektrische Scheidungskraft und sie bewirkt, daß die Flüssigkeit in der Nähe des einen Metalls (des Zinks) eine höhere Spannung hat wie in der Nähe des anderen (des Kupfers). Sowie also die beiden Metalle durch einen Draht verbunden werden, fließt die Elektrizität durch den Draht und durch das Element selbst hindurch, und die elektrische Scheidungskraft bewirkt, daß dieser Strom ein dauernder ist. Wir können uns dieses Verhalten durch einen Vergleich mit dem Strömen von Wasser leicht klarmachen. In einem Teich stehen zwei Röhren, in welche durch eine Pumpmaschine Wasser hineingepumpt ist, und zwar so, daß das Niveau des Wassers in der einen Röhre höher ist als in der anderen. Sowie man die beiden Röhren durch eine zwischen ihnen angelegte Röhre verbindet, fließt das Wasser aus der Röhre mit höherem Niveau in die andere. Und wenn man durch die Pumpmaschine dafür sorgt, daß das Niveau der beiden Röhren stets in gleicher Höhe gehalten wird, so fließt das Wasser fortwährend von der ersten Röhre durch das Verbindungsrohr zur zweiten und wird durch die Pumpe wieder auf das erste Niveau gehoben. Ganz entsprechend ist es bei der Elektrizität. Dem Niveau beim Wasser entspricht die Spannung der Elektrizität, die Funktionen der Pumpmaschine übernimmt die elektrische Scheidungskraft. Von der höheren Spannung auf dem Kupfer fließt die positive Elektrizität durch den Verbindungsdraht zum Zink und durch die Flüssigkeit zum Kupfer zurück. Die elektrische Scheidungskraft bringt sie wieder auf die ursprüngliche Spannung, die des Kupfers. Ein elektrischer Strom fließt also dauernd nur in einem geschlossenen Kreise, d. h. in einem Kreise, der gebildet ist aus einem Element, dessen Pole durch Leiter miteinander verbunden sind.

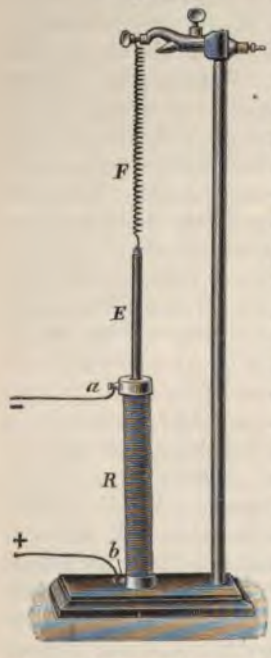
Man nennt eine solche geschlossene Leitung, die aus einem Element (oder einer Kette) und einem Verbindungsdraht besteht, einen Stromkreis oder besser einen einfachen Stromkreis (im Gegensatz zu verzweigten Stromkreisen, von denen später die Rede sein wird). Wenn der Strom fließt, so geht durch jeden Teil des gesamten geschlossenen Kreises in jedem Augenblick eine gewisse Menge von Elektrizität, eine gewisse Anzahl von Coulomb, hindurch. Es kann der Stromkreis an verschiedenen Stellen verschieden große Querschnitte haben, stets muß doch bei einem konstanten Strome durch jeden Querschnitt in einer Sekunde gleichviel Elektrizität hindurchfließen. Denn wenn an einen Querschnitt mehr Elektrizität hinströmen als von ihm fortströmen würde, so würde ja an dieser Stelle eine Anhäufung der Elektrizität stattfinden. Man nennt die Elektrizitätsmenge, also die Anzahl Coulomb, die in einer Sekunde durch irgend einen Querschnitt des Stromkreises hindurchfließt, die Stromstärke oder Stromintensität. Wieviel Elektrizität durch einen Querschnitt in einer Sekunde hindurchfließt, das hängt natürlich von verschiedenen Umständen ab. Das hängt einmal davon ab, wie groß die treibende Kraft ist, welche den galvanischen Strom hervorruft, wie groß also die elektromotorische Kraft des Elementes ist. Zweitens hängt es aber auch davon ab, durch welche Stoffe der Strom fließt und wie gestaltet diese sind. Aber mögen sie auch Formen haben, welche sie wollen, in einem bestimmten Stromkreis fließt durch jeden Querschnitt, wie groß oder wie klein er sein mag, immer ein und dieselbe Menge Elektrizität in der Sekunde. Mit anderen Worten heißt dies, die Stromstärke ist in einem Stromkreis überall dieselbe. In jedem einfachen Stromkreis hat also der elektrische Strom eine gewisse Stärke und zwar an allen Stellen des Stromkreises dieselbe. Man kann sich dies wieder an dem Vergleich mit unseren Röhren, in welchen ein Strom von Wasser fließt, klarmachen. Wenn die eine Röhre an verschiedenen Stellen etwa verschiedene Weite besitzt, und durch die Pumpmaschine in diese Röhre in jeder Sekunde z. B. 300 ccm Wasser hineingepumpt werden und ebensoviel am anderen Ende abfließen, so daß die Röhre immer ganz mit Wasser gefüllt ist, so fließen durch jeden Querschnitt, mag er groß oder klein sein, in jeder Sekunde gerade 300 ccm Wasser. An engeren Stellen der Röhre fließt dann eben das Wasser rascher, an weiteren langsamer. Ganz so ist es beim elektrischen Strome. Die Stromintensität, die Stärke des Stromes ist überall dieselbe, durch jeden Querschnitt des Stromkreises fließt in einer bestimmten Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge hindurch.

Um nun die Stromstärke in irgend einem Stromkreise messen zu können, müssen wir wieder zunächst eine Einheit für sie festsetzen. Wir wollen sagen, derjenige Strom hat die Einheit der Stromstärke, bei welchem in jeder Sekunde gerade ein Coulomb durch jeden Querschnitt fließt. Diese Einheit nennen wir 1 Ampere und drücken also alle Stromstärken in Ampere aus. Durch welche Mittel wir dann die Stromstärke in irgend einem Stromkreis messen, d. h. in Ampere ausdrücken können, wird sich sofort ergeben. Den tausendsten Teil eines Ampere nennt man Milliampere.

Je stärker ein elektrischer Strom ist, je größer seine Stromintensität

ist, desto stärker sind die Wirkungen, die er erzeugt. Wir werden also die Stärke des Stromes erkennen können aus der Größe seiner Wirkungen. Das einfachste Mittel dazu bieten die magnetischen Wirkungen des Stromes, für welche wir oben S. 56 bei dem einfachen Galvanoskop ein Beispiel gesehen haben. Eine andere magnetische Wirkung eines elektrischen Stromes, die wir hier benutzen wollen, ist an dem Apparat in Fig. 39 zu beobachten. Sie besteht darin, daß eine von einem Strom durchflossene Drahtrolle R einen Eisenstab E, der an einer Spiralfeder F aufgehängt ist, in sich hineinzieht, und zwar um so tiefer, je stärker der Strom ist, der durch die Drahtwindungen der Rolle fließt. Man verbindet zu dem Zweck die beiden Schrauben a und b, in welche die Drahtwindungen der Rolle endigen, mit dem galvanischen Element. Hat man nun z. B. einmal an diesem Instrument festgestellt, wie tief der Eisenstab in die Rolle hineingezogen wird, wenn durch die Rolle ein Strom von 1, 2, 3 u. s. w. Ampere hindurchgeht, so kann man offenbar nun immer umgekehrt aus der Stellung des Eisenstabes die Zahl der Ampere bestimmen, welche durch die Rolle hindurchgehen. Auf genau diesem Prinzip beruhen gewisse Meßinstrumente für die Stromstärke, welche man Federgalvanometer nennt. Fig. 40 zeigt ein solches für Demonstrationen eingerichtetes Instrument von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. Man sieht in dem Apparat die Drahtrolle R, den Eisenkern E und die Spirale F, an der er aufgehängt ist. Zum Zwecke der deutlichen Erkennung aus der Ferne ist der Zeiger Z um eine Achse drehbar angebracht, so daß er beim Heruntergehen des Eisenkerns sich nach rechts, beim Heraufgehen nach links dreht, und dabei vor einer Skala spielt, an welcher für jede Stellung die Stromstärke in Ampere gleich angeschrieben ist. Bei a und b wird der Strom vom Element der Rolle R zugeführt. Man kann diese Instrumente, die nach F. Kohlrauschs Angaben konstruiert werden, auch so einrichten, daß sie viel kleinere oder viel größere Stromstärken messen. Für uns genügt es hier vorläufig, daß wir dadurch ein Instrument haben, welches uns die Stromstärken in Ampere zu messen gestattet.

Fig. 39.



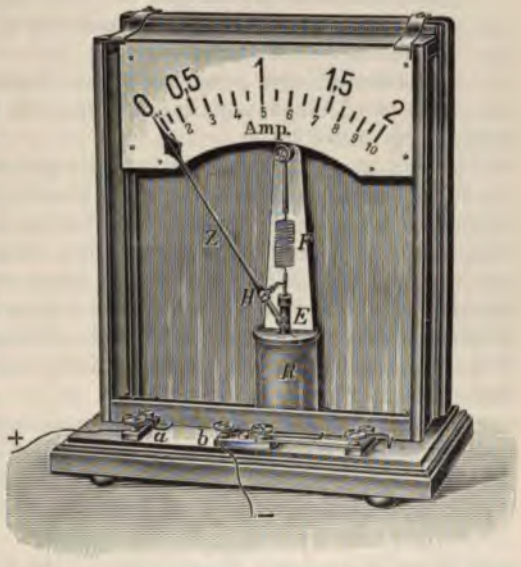
Wovon hängt nun die Stärke eines Stromes ab? Jedenfalls von der Größe der elektromotorischen Kraft des Elementes. Je größer die elektromotorische Kraft ist, welche die Elektrizität bewegt, desto größer kann auch die Menge der Elektrizität sein, die durch jeden Querschnitt pro Sekunde hindurchgeht, d. h. desto größer muß die Stärke des Stromes in dem Stromkreise sein. Und das ist in der Tat der Fall, wie wir uns durch unser Federgalvanometer überzeugen können. Nehmen wir z. B. ein Daniellsches Element und verbinden wir es durch ein Paar dünne Drähte (warum sie dünn sein müssen, wird sich bald zeigen) mit dem Meßinstrument, so erhalten wir eine gewisse Stromstärke, sagen wir von 0,5 Ampere.

Verbinden wir jetzt drei solcher Elemente hintereinander und setzen die Endpole dieser Elemente durch dieselben dünnen Drähte mit den Klemmen des Meßinstrumentes in Verbindung, so zeigt dies jetzt die dreifache Stromstärke, 1,5 Ampere, an.

Ebendasselbe Resultat könnten wir mit mehr oder weniger Elementen erhalten. Wir haben danach das Gesetz:

A. Je größer die elektromotorische Kraft ist, die in einem bestimmten Stromkreis wirkt, desto größer ist unter sonst gleichen Umständen auch die Stärke des Stromes. Wird die elektromotorische Kraft zwei-, drei-, viermal so groß als zuerst, so wird auch die Stromstärke zwei-, drei-, viermal so groß. Der eine Faktor, von dem die Stromstärke abhängt, ist dadurch ermittelt und sein Einfluß erkannt.

Fig. 40.



Außer von der elektromotorischen Kraft hängt aber die Stromstärke noch ab von der Art und Gestalt und Größe der Körper, durch welche die Elektrizität fließt.

Wir haben uns früher schon überzeugt, daß alle Körper dem Durchgang der Elektrizität einen gewissen Widerstand entgegensetzen, die Isolatoren einen außerordentlich großen, die Halbleiter einen kleineren, die Leiter einen verhältnismäßig sehr kleinen. Je größer nun der Widerstand ist, den ein Strom in seinem gesamten Stromkreis zu überwinden hat, desto weniger Elektrizität kann unter sonst gleichen Umständen in einer bestimmten Zeit, z. B. in einer Sekunde, durch einen Querschnitt gehen, desto geringer ist also die Stärke des Stromes. Es hängt also die Stromstärke noch ab von dem gesamten Widerstande, den der Strom in seiner Bahn zu überwinden hat. Dieser Widerstand setzt sich aber aus verschiedenen Teilen zusammen. Er besteht aus dem Widerstand, den das Element selbst, also seine Metalle und seine Flüssigkeiten dem Strom darbieten, und er besteht aus dem Widerstand des Verbindungsdrahtes, resp. aller der Drähte, durch die der Strom zu fließen hat, also z. B. wenn der Strom durch unser Federgalvanometer geht, auch aus dem Widerstand der Drahtrolle desselben. Was wir speziell unter Widerstand verstehen, werden wir nachher auseinandersetzen. Jedenfalls haben wir den Satz:

B. Je größer der gesamte Widerstand des Stromkreises ist, um so geringer ist die Stärke des

Stromes. Wird der gesamte Widerstand doppelt, dreifach, vierfach so groß als er war (während die elektromotorische Kraft ungeändert bleibt), so wird die Stärke des Stromes bloß die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel von der ursprünglichen.

Diese beiden Gesetze A und B zusammen, die von höchster Wichtigkeit für die gesamte Elektrizitätslehre sind, nennt man das Ohmsche Gesetz.

Wir können die beiden Sätze zusammen in folgender Form darstellen.

In jedem einfachen geschlossenen Stromkreis ist die Stromstärke gleich der elektromotorischen Kraft dividiert durch den ganzen Widerstand:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}.$$

Dieses Ohmsche Gesetz gilt für jeden galvanischen Strom, wenn man nur alle in einem Stromkreis vorhandenen elektromotorischen Kräfte und alle Widerstände berücksichtigt.

Wir müssen nun zunächst näher bestimmen, wie der Widerstand von Leitern abhängt von der Größe und Gestalt, dem Stoffe und der Anordnung derselben.

In den meisten Anwendungen des galvanischen Stromes ist der Weg, durch den die Elektrizität fließt, ein Draht, oder hat wenigstens die Form eines Drahtes. Man nimmt Kupferdrähte oder Platindrähte oder Eisendrähte, um den Strom durchzuleiten. Aber auch, wenn der elektrische Strom durch eine Flüssigkeit fließt, kann man deren Form als die eines Drahtes ansehen. Man kann von der Länge der durchlaufenen Flüssigkeit sprechen und von ihrem Querschnitt. Untersuchen wir also, wie sich der Widerstand eines Drahtes mit seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material ändert.

Wir nehmen ein bestimmtes galvanisches Element, z. B. einen Daniell, und verbinden seine Pole mit unserem Federgalvanometer durch zwei Kupferdrähte von ganz bestimmtem Querschnitt und zusammen ganz bestimmter Länge, z. B. der Länge von 100 m. Dann zeigt unser Meßinstrument eine bestimmte Stromstärke an. Ersetzen wir dann die Drähte von 100 m Länge durch genau ebenso dicke Kupferdrähte von 200 m Länge, so bekommen wir eine andere, kleinere Stromstärke, und machen wir dieselbe Operation mit gleich dicken Kupferdrähten von 300, 400, 500 m u. s. w. Länge, so bekommen wir immer kleinere Stromstärken. Die elektromotorische Kraft des Elements, der Widerstand der Flüssigkeiten im Element und der Widerstand des Drahtes im Federgalvanometer sind unverändert geblieben. Bloß der Widerstand der Verbindungsdrähte ist ein anderer geworden und dadurch auch die Stromstärke. Wir können daher berechnen, wie sich der Widerstand von Drähten von gleichem Material und gleicher Dicke verändert, wenn die Länge variiert. Und so findet man, daß, wenn die Länge eines Drahtes die zwei-, drei-, vierfache wird, auch der Widerstand des Drahtes der zwei-, drei-, vierfache wird. Es ergibt sich also daraus das Gesetz:

a) Der Widerstand eines Drahtes von bestimmtem Material und bestimmtem Querschnitt ist um so größer, je größer seine Länge ist.

Auf ganz dieselbe Weise können wir untersuchen, wie sich der Widerstand eines Drahtes ändert, wenn sich der Querschnitt ändert. Wir nehmen eine Reihe von Kupferdrähten von ein und derselben Länge, deren Querschnitte aber verschieden sind, und lassen der Reihe nach den Strom aus einem Element durch jeden von ihnen fließen. Dann können wir aus den verschiedenen Stromstärken, die uns unser Galvanometer angibt, die Größe des Widerstandes der verschiedenen Drähte berechnen und auf diese Weise finden wir:

b) Der Widerstand von Drähten bei gleichbleibendem Material und gleichbleibender Länge ist um so kleiner, je größer ihr Querschnitt ist.

Wird der Querschnitt zwei-, drei-, viermal so groß, so ist der Widerstand bloß die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel des ursprünglichen.

Die Form des Querschnitts, ob er kreisförmig oder viereckig oder unregelmäßig ist, ist gleichgültig. Nur auf seine Größe kommt es an.

Wir haben damit die Gesetze gefunden, wie der Widerstand eines Drahtes abhängt von seiner Größe und Gestalt. Der Widerstand hängt aber auch wesentlich ab von der Art des Stoffes, aus welchem der Leiter besteht. Ein Kupferdraht von z. B. 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt hat einen anderen Widerstand als ein Aluminiumdraht von derselben Länge und demselben Querschnitt. Legt man daher z. B. den Widerstand eines Kupferdrahtes von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt als Einheit zu Grunde, so kann man für jedes andere leitende Material eine Zahl bestimmen, welche angibt, wievielmal dessen Widerstand bei derselben Länge und demselben Querschnitt größer oder kleiner ist. Diese Zahl nennt man den spezifischen Widerstand des Leiters, bezogen auf Kupfer als Einheit. Wir werden weiter unten Tabellen über die spezifischen Widerstände vieler Metalle und anderer Leiter geben. Hier sei nur das Beispiel angeführt, daß der spezifische Widerstand von Eisen 6,10 ist, bezogen auf Kupfer als Einheit, der von Neusilber 18,8. Das heißt also, ein Eisendraht hat immer einen 6,10mal so großen Widerstand als ein Kupferdraht von derselben Länge und demselben Querschnitt, ein Neusilberdraht gar einen 18,8mal so großen Widerstand.

Nachdem wir so gesehen haben, wie der Widerstand eines Leiters von seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material abhängt, können wir das Gesetz aussprechen:

c) Der Widerstand eines Leiters ist gleich seinem spezifischen Widerstand, multipliziert mit seiner Länge, dividiert durch seinen Querschnitt:

$$\text{Widerstand eines Leiters} = \text{spezifisch. Widerstand} \times \frac{\text{Länge}}{\text{Querschn.}}$$

Dies gilt für Leiter jeder Art, sowohl für feste Leiter — wie Metalle, Kohle — als für flüssige Leiter, also auch für die Flüssigkeiten in galvanischen Elementen.

Wir wollen nun zunächst auch für den Widerstand eine Einheit festsetzen, um alle Widerstände gleichartig bezeichnen zu können. Man ist international übereingekommen, als Einheit des Widerstandes denjenigen zu nehmen, welchen ein Quecksilberfaden von 106,3 cm Länge und 1 qmm

Querschnitt bei 0° zeigt. Diesen Widerstand nennt man 1 Ohm. Wir werden also alle Widerstände in Ohm ausdrücken. Dieser Widerstand, 1 Ohm, steht nämlich mit den von uns schon eingeführten Einheiten der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke in dem Zusammenhang, daß

Fig. 41.

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$$

ist.

Mit den bisherigen Kenntnissen können wir zunächst den Widerstand von galvanischen Elementen genauer untersuchen.

Nehmen wir ein galvanisches Element, z. B. einen Daniell, und verbinden wir seine Pole durch einen Draht von einem bestimmten Widerstand, so fließt durch diesen geschlossenen Stromkreis ein Strom, dessen Stärke gleich der elektromotorischen Kraft des Daniells dividiert durch den gesamten Widerstand ist. Der gesamte Widerstand setzt sich zusammen aus dem des Drahtes und dem des Elementes selbst, welchen man den inneren Widerstand des Elementes nennt.

Schaltet man nun eine Reihe von Daniell hintereinander, wie in Fig. 41, so fließt der Strom von dem positiven Pol (+) durch den äußeren Verbindungsdraht zum negativen Pol (—), und dann durch die Kette zurück zum + Pol, d. h. vom achten Element zum siebenten, von diesem zum sechsten u. s. w.

Es ist bei dieser Anordnung immer das Zink des einen Elementes mit dem Kupfer des anderen verbunden. Die elektromotorische Kraft, die in dieser Kette wirkt, ist also die achtfache eines einzigen Daniell (S. 48). Aber auch der innere Widerstand der ganzen Kette ist der achtfache eines Daniell, weil der Strom jetzt die achtfache Länge der Flüssigkeit bei gleichem Querschnitt zu durchlaufen hat. Die gesamte Stärke des Stromes ist also

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{achtfache elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand} + \text{achtfacher innerer Widerstand eines Daniell}}.$$

Ist nun z. B. der Drahtwiderstand sehr klein gegenüber dem inneren Widerstand eines Daniell, so daß man ihn vernachlässigen kann, so ist nahezu

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{innerer Widerstand eines Daniell}}.$$

Man gewinnt also dann gar nichts an Stromintensität, wenn man die 8 Elemente hintereinander schaltet. Der Gesamtstrom ist ungefähr ebenso stark, als wenn man nur einen Daniell genommen hätte.

Ist dagegen der Drahtwiderstand sehr groß, viel größer als der gesamte Widerstand der Kette, so hat man nahezu

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{achtfache elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand}}.$$

Jetzt ist also die Stromstärke nahezu 8mal so groß, als wenn man nur einen Daniell anwendet.

Es ergibt sich also die Regel: Ist der Widerstand des Verbindungsdrahtes einer Kette oder, wie man auch sagt, des äußeren Stromkreises sehr groß gegen den inneren Widerstand der Kette, so ist es vorteilhaft, die Elemente hintereinander zu einer Kette zu schalten, um eine möglichst große Stromstärke zu erhalten.

Man kann aber eine Reihe von Elementen auch anders verbinden, nämlich so, daß man alle Kupferplatten miteinander verbindet und ebenso alle Zinkplatten. Eine solche Anordnung ist in Fig. 42 dargestellt. Man sagt dann, die Elemente seien nebeneinander geschaltet oder parallel geschaltet. Hier sind die Verhältnisse ganz anders. Alle die Kupferzylinder bilden zusammen eine große Kupfermasse und alle die Zinkzylinder eine große Zinkmasse, die der Kupfermasse gegenübersteht. Die elektromotorische Kraft hängt aber, wie wir wissen, gar nicht von der Größe der Kupfer- und Zinkmassen ab, sie ist also in dieser Kettenanordnung einfach gleich der eines einzigen Daniell. Die elektromotorische Kraft wird also durch eine derartige Anordnung von Elementen nicht erhöht. Aber der innere Widerstand dieser Kette ist ein kleinerer als der eines einzigen Daniell. Denn denkt man sich alle Flüssigkeiten und Metalle zusammen in einem Gefäß, so ist der Querschnitt der Flüssigkeiten, durch den der Strom fließt, jetzt 8mal so groß wie bei einem Daniell. Folglich ist der innere Widerstand dieser Kette bloß der achte Teil von dem inneren Widerstand eines Daniell. Verbindet man jetzt die Pole dieser Kette (die in der Figur rechts oder links mit + oder — bezeichnet sind) durch den äußeren Verbindungsdraht, so hat man

Fig. 42.

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand} + {}^1/_8 \text{ innerer Widerstand eines Daniell}}.$$

Jetzt sind die Verhältnisse gerade die entgegengesetzten wie früher, bei Hintereinanderschaltung der Elemente.

Ist nämlich der Drahtwiderstand klein gegen den inneren Widerstand der Kette, so ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{{}^1/_8 \text{ innerer Widerstand eines Daniell}},$$

also die Stromstärke nahezu 8mal so groß wie bei einem Daniell. Ist dagegen der Drahtwiderstand sehr groß, so ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand}}.$$

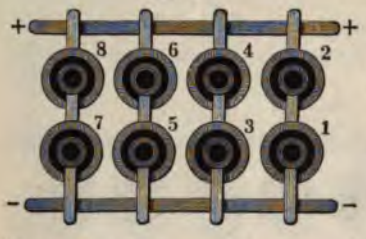
Dann ist also die Stromstärke nahezu dieselbe wie bei einem einzigen Daniell. Man gewinnt also dann gar nichts an Stromstärke.

Wir haben danach die beiden Regeln:

Ist der Widerstand des äußeren Stromkreises

sehr groß, so ist es vorteilhaft, die Elemente hintereinander zu schalten; ist er sehr klein, so ist es vorteilhaft, sie nebeneinander zu schalten, um möglichst große Stromstärken zu erhalten.

Fig. 43.



Ist der Widerstand des Drahtes nicht sehr groß und auch nicht sehr klein gegen den inneren Widerstand eines Elements, so kann man die Elemente teils hintereinander, teils nebeneinander schalten, wie in Fig. 43 und 44 an zwei Beispielen dargestellt ist.

In Fig. 43 sind immer je 2 Daniell hintereinander und 4 nebeneinander geschaltet. Es ist also der innere Widerstand dieser Kette $= \frac{2}{4} =$ dem halben Widerstand eines einzelnen Elements, denn die Flüssigkeit hat die doppelte Länge und den vierfachen Querschnitt von der in einem einzigen Element. Die elektromotorische Kraft ist dabei gleich 2 Daniell, weil nur je 2 Elemente hintereinander geschaltet sind. Dagegen in Fig. 44 sind 4 Elemente hintereinander und je 2 parallel geschaltet. Der innere Widerstand dieser Kette ist also $\frac{4}{2}$, d. h. doppelt so groß wie der eines einzelnen Elements, und die elektromotorische Kraft ist gleich der von 4 Daniell.

Wenn man ein Element oder eine Kette durch einen sehr kleinen äußeren Widerstand, z. B. durch einen kurzen dicken Draht, schließt, so sagt man, das Element oder die Kette ist kurzgeschlossen. Die Stromstärke wird dann in jedem Fall die größte, die das betreffende Element überhaupt liefern kann, sie ist nämlich gleich der elektromotorischen Kraft des Elementes selbst, dividiert durch seinen Widerstand. Man sieht, daß, um bei der Kurzschließung aus einem Element eine recht hohe Stromstärke erhalten zu können, es vorteilhaft ist, daß das Element selbst einen sehr kleinen inneren Widerstand besitzt.

Fig. 44.

Das einfache Schema eines geschlossenen Stromkreises, wie wir ihn bisher allein betrachteten, ist in Fig. 45 dargestellt. Darin ist E ein galvanisches Element, und der Verbindungsdraht geht von dem einen Pol des Elements zum anderen. Er kann dabei durch viele Apparate gehen, aber es ist immer ein einziger unverzweigter Draht.

Um die Verhältnisse in einem solchen einfachen Stromkreis noch näher zu untersuchen, wollen wir das Schema in Fig. 46 benutzen. Dasselbe stellt in seinem unteren Teil ZgK eine mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Glasröhre dar, der obere Teil ZbK stellt einen Draht dar. Bei Z befindet sich eine Zinkplatte, bei K eine Kupferplatte. Die Kupferplatte hat positive Spannung, die Zinkplatte eine ebenso große negative Spannung. Auf dem Draht KhZ herrscht an allen Stellen eine andere Spannung, und

zwar nimmt dieselbe von dem positiven Wert bei K allmählich durch Null hindurch ab bis zu dem negativen Werte bei Z. An einer Stelle ist also die Spannung Null und zwar, wenn der Draht aus einem überall gleich dicken Metalldraht besteht, bei b, gerade in der Mitte zwischen K und Z. Entsprechendes findet in der unteren Hälfte der Figur statt. Die an K anliegende Schicht der Schwefelsäure hat negative, die an Z anliegende positive Spannung, und in der unteren Hälfte nimmt also die Spannung von Z bis K ab. Auch hier ist an einem Punkt in der Mitte, etwa bei g, die Spannung Null. An den Metallen selbst findet ein Sprung der Spannung statt, hervorgebracht durch die elektrische Scheidungskraft.

Fig. 45.

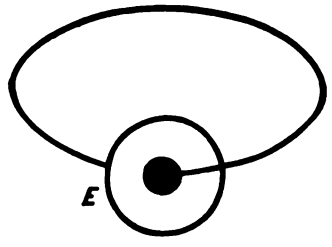
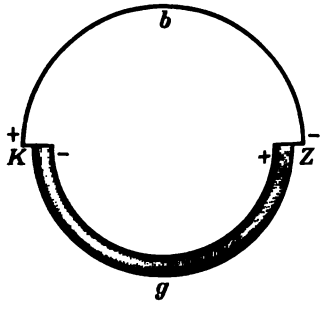
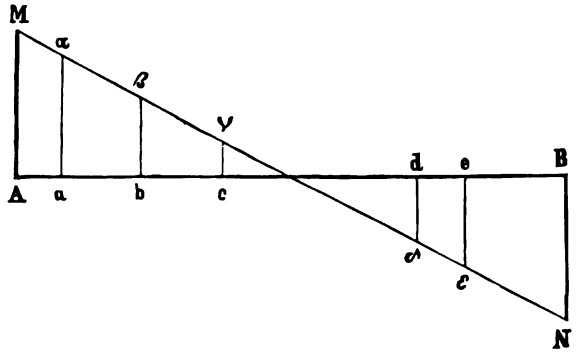


Fig. 46.



Untersuchen wir nun die Verteilung der Spannung auf dem Draht allein. Denken wir uns denselben, wie in Fig. 47, gerade gestreckt und aus einem homogenen Metall bestehend, A B, so herrscht am Anfang desselben in A die positive Spannung, die wir uns durch die Strecke A M repräsentiert denken können, am Ende B die ebenso große negative Spannung, die durch die Linie B N repräsentiert sei. An den zwischenliegenden Stellen a b c d e hat die Spannung dann die Werte, deren Größe durch die Linien a α, b β, c γ, d δ, e ε dargestellt ist. In der Mitte des Leiters ist die Spannung Null. Zwischen je zwei Punkten des Drahtes herrscht also eine Spannungsdifferenz. So ist die Spannung in a größer als die in b um die Größe a α — b β, die an a größer als die an e um a α + e ε u. s. w. An zwei beliebigen Punkten des Drahtes hat also die Spannung verschiedene Werte, und gerade deswegen strömt die Elektrizität durch den Draht; denn die positive Elektrizität bewegt sich stets von Stellen höherer zu Stellen niederer Spannung. In jedem Stück eines solchen Drahtes gilt also nun wieder ein ähnliches Gesetz, wie in dem ganzen geschlossenen Stromkreis. Die Stromstärke, d. h. die Menge der in einer Sekunde durchfließenden Elektrizität in einem Stück eines Drahtes, hängt ab von dem Spannungs-

Fig. 47.



unterschied an den beiden Enden dieses Stückes und von dem Widerstand dieses Stückes:

$$\text{Stromstärke in einem Drahtstück} = \frac{\text{Spannungsunterschied an seinen Endpunkten}}{\text{Widerstand des Drahtstückes}}.$$

Da die Stromstärke in dem ganzen Draht überall dieselbe ist, so gilt für jedes Stück eines Drahtes das Gesetz

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannungsunterschied an seinen Endpunkten}}{\text{Widerstand des Drahtstückes}}.$$

Dafür kann man auch umgekehrt sagen:

Spannungsunterschied an den Enden = Stromstärke × Widerstand des Drahtstückes,

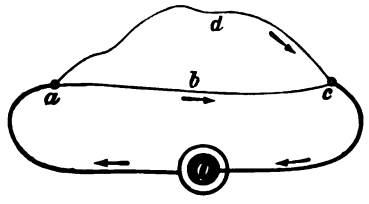
oder die Spannung am Ende eines Drahtstückes ist kleiner als am Anfang, und zwar um das Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand des Drahtstückes. Dies kann man zweckmäßig so ausdrücken: beim Durchströmen durch ein Drahtstück verliert der Strom an Spannung, *erleidet er einen Spannungsverlust*, welcher gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Drahtstückes ist. Die Überwindung eines jeden Widerstandes durch den Strom ist also mit einem bestimmten Spannungsverlust verbunden, der um so größer ist, je größer der überwundene Widerstand ist. Auf dem Wege b c in Fig. 47 erleidet also der Strom einen Spannungsverlust, welcher gleich $b\beta - c\gamma$ ist, auf dem Wege a e einen Verlust der Spannung, welcher gleich $a\alpha + e\varepsilon$ ist.

Am Zink selbst und am Kupfer selbst erfährt die Spannung durch die elektrische Scheidekraft eine sprungartige Änderung. Vom Zink zur angrenzenden Flüssigkeit findet eine Spannungszunahme und ebenso von der angrenzenden Flüssigkeit zum Kupfer eine solche infolge der Scheidungskräfte statt. Fließt nun der Strom vom Kupfer außen zum Zink und vom Zink innen durch die Flüssigkeit zum Kupfer, so muß der Spannungsverlust, den er auf dem ganzen Wege erfährt, gleich sein dem Spannungsgewinn, den er am Zink und am Kupfer durch die Scheidungskräfte bekommt. Also muß der Spannungsverlust auf dem äußeren Verbindungsdraht + Spannungsverlust im Inneren des Elementes = Spannungsgewinn am Zink + Spannungsgewinn am Kupfer sein. Letztere beiden Spannungszunahmen zusammen sind aber nichts anderes, als was wir die elektromotorische Kraft des Elementes genannt haben. Und wir können daher sagen, die elektromotorische Kraft der Kette ist, wenn der Strom fließt, gleich dem Spannungsverlust im äußeren + dem Spannungsverlust im inneren Stromkreis. Der Spannungsverlust im äußeren Stromkreis ist aber nichts anderes als der Spannungsunterschied an den Polen des *geschlossenen* Elementes. Man bezeichnet ihn gewöhnlich als die *Klemmenspannung*. Und wir können daher auch unseren Satz so ausdrücken: die elektromotorische Kraft eines Elementes ist gleich der Klemmenspannung + dem Spannungsverlust im Inneren des Elementes. Daraus sieht man, daß die Klemmenspannung an einem geschlossenen Element kleiner ist als die elektromotorische Kraft des Elementes, und zwar kleiner um den Betrag des Spannungsverlustes im Innern des Elementes, d. h. um das Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand.

Bisher betrachteten wir immer einen einfachen geschlossenen Kreis, in dem der Strom fließt.

Man braucht aber für elektrische Untersuchungen und Anwendungen oft einen allgemeineren Fall. Man läßt nämlich den Strom durch eine verzweigte Leitung gehen, wie sie in einem einfachen Falle in Fig. 48 dargestellt ist. Darin kommt der elektrische Strom in der Richtung des Pfeiles aus dem Element Q, fließt zuerst wie gewöhnlich bis a, dann aber verzweigt er sich und fließt sowohl durch d als durch b in der Richtung der Pfeile, bis er nach c kommt. Dort vereinigen sich die beiden Stromzweige wieder und nun fließt er wie früher zum Element zurück. Auch für diesen Fall der Stromverzweigung lassen sich die Gesetze aus der oben angeführten Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes ableiten.

Fig. 48.



Zunächst ergibt sich hierbei, daß die Stromstärke nun nicht mehr in der ganzen Leitung dieselbe ist, sondern daß vielmehr in den verschiedenen Zweigen des Stromkreises verschiedene Stromstärken herrschen. Am Punkt a ist eine bestimmte Spannung vorhanden, am Punkt c eine andere. Durch den Spannungsunterschied zwischen a und c wird die Elektrizität sowohl durch a b c, als durch a d c getrieben. Es ist folglich:

$$\text{die Stromstärke in a b c} = \frac{\text{Spannungsunterschied zwischen a und c}}{\text{Widerstand von a b c}}$$

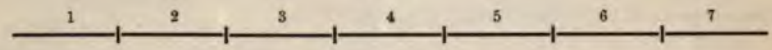
$$\text{und die Stromstärke in a d c} = \frac{\text{Spannungsunterschied zwischen a und c}}{\text{Widerstand von a d c}}.$$

Daraus folgt, daß sich die Stromstärken in den beiden Zweigen umgekehrt wie ihre Widerstände verhalten. In dem unverzweigten Teil der Leitung a Q c ist die Stromstärke die Summe von den beiden Zweigstromstärken. Haben also z. B. die beiden Zweige gleichen Widerstand, so fließt durch jeden ein Strom, dessen Stärke bloß die Hälfte von der des Hauptstromes ist. Hat z. B. das Stück a d c in der Figur einen doppelt so großen Widerstand wie das Stück a b c, so ist der Strom, der durch a d c fließt, nur halb so stark wie der, der durch a b c fließt, und die Summe der Stromstärken in den beiden Zweigen ist gleich der Stromstärke in dem ungeteilten Stück des Stromes.

Der Widerstand der beiden Zweige des Leiters zusammen gegen den Strom ist hier nicht etwa gleich der Summe der Widerstände der beiden Leiter, sondern viel kleiner, kleiner als der Widerstand jedes einzelnen Leiters allein genommen. Man kann das sofort erkennen, wenn man z. B. annimmt, die beiden Zweige seien gleich lang und haben gleichen Querschnitt. Dann fließt der Strom von a aus durch beide Zweige zu gleicher Zeit, und dies ist dasselbe, als ob nur ein einziger Leiter von a bis c ginge, aber mit einem doppelt so großen Querschnitt. Der Widerstand dieses Leiters ist dann, wie wir wissen, nur die Hälfte des früheren.

Also diese beiden gleich langen und gleich dicken Zweige des Leiters haben zusammen nur einen Widerstand, der gleich der Hälfte des Widerstandes jedes einzelnen Leiters ist. Das ist ein sehr wichtiger Satz. Man sagt von zwei oder mehr Leitern, deren Anfangspunkte alle miteinander verbunden sind und deren Endpunkte auch miteinander verbunden sind,

Fig. 49.



sie seien nebeneinander geschaltet oder auch parallel geschaltet, während man von Leitern, die so verbunden sind, daß der Anfangspunkt des einen mit dem Endpunkt des anderen verbunden ist, sagt, sie seien hintereinander geschaltet oder in Serie geschaltet. Diese Bezeichnungen sind ganz analog den oben erwähnten bei der Verbindung von galvanischen Elementen.

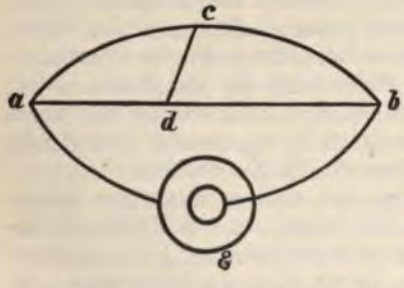
Fig. 50.

Haben wir also z. B. 7 Drähte, alle von gleichem Widerstand, und verbinden wir sie wie in Fig. 49, so ist der Widerstand dieser zusammenhängenden Drähte der siebenfache von jedem einzelnen. Die Drähte sind dabei hintereinander geschaltet.

Verbinden wir aber die Drähte wie in Fig. 50, so ist der Widerstand der 7 Drähte zusammen gegen den Strom bloß $^1/_7$ von dem jedes einzelnen, also bloß $^1/_{49}$ von dem in Fig. 49. Die Drähte sind dabei nebeneinander geschaltet.

Man kann sich dieses Verhalten wieder leicht klarmachen, wenn man an die Bewegung einer wirklichen Flüssigkeit, des Wassers, denkt.

Fig. 51.



Läßt man aus einem Reservoir Wasser durch eine Röhre von 5 m Länge und einem bestimmten Querschnitt ausfließen, so wird die in einer Minute ausfließende Wassermenge abhängen von der Reibung in der Röhre, die wir mit dem Widerstand eines Leiters identifizieren können. Hat die Röhre statt 5 m die doppelte Länge, 10 m, so ist die Reibung auch die doppelte, es fließt also weniger Wasser in der Minute aus.

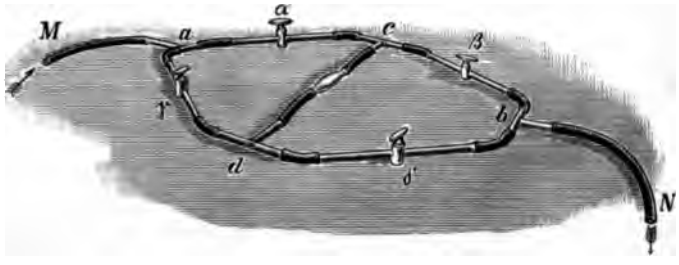
Hat man dagegen statt einer Ausflußröhre von 10 m Länge zwei nebeneinander von je 5 m Länge, so fließt durch diese die doppelte Wassermenge aus als durch eine. Es kommt zwar die Reibung bei jeder Röhre in Betracht, aber durch zwei gleich lange und dicke Röhren fließt eben die doppelte Wassermenge in der Minute aus.

Qualitativ genau so ist es bei der Elektrizität. Je mehr Drähte man hintereinander schaltet, desto größer ist der Widerstand des Systems, desto kleiner wird die Stromstärke bei gleicher elektromotorischer Kraft; je mehr man nebeneinander schaltet, desto kleiner wird der Widerstand, desto größer die Stromstärke.

Man kann die Stromverzweigung noch komplizierter machen. Man kann die beiden Zweige einer Leitung wieder durch einen Draht miteinander verbinden, wie in Fig. 51.

Hier sind die beiden Zweige a d b und a c b, die sich an das Element E anschließen, noch durch einen Draht c d verbunden. Diesen Draht nennt

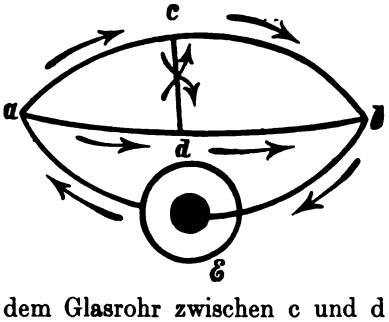
Fig. 52.



man die Brücke und die ganze Verzweigung, die sehr wichtig ist, „Brückenverzweigung".

Wenn man sich ein ebensolches System aus Röhren gebildet denkt, wie in Fig. 52, durch welche Wasser strömt, so kann man eine wichtige Eigenschaft dieser Anordnung sofort erkennen. Durch den Schlauch bei M läßt man aus der Wasserleitung immer nach a hin Wasser strömen, welches durch die Röhren a c und c b einerseits und durch die Röhren a d und d b andererseits nach b fließt, von wo es durch den Schlauch N abfließt. Dann sucht in dem Verbindungsstück c d zu gleicher Zeit das Wasser von c nach d nach unten und von d nach c nach oben zu fließen. Man kann nun offenbar die Stärke der Strömung in den vier Röhren durch die Hähne α, β, γ, δ so regulieren, daß in dem Rohr c d das Wasser stillsteht, sich gar nicht bewegt, daß also z. B. ein leichter Flügel, der in dem Glasrohr zwischen c und d angebracht ist, in Ruhe bleibt.

Fig. 53.



Ganz ebenso ist es nun bei elektrischen Strömen. In der Brücke nämlich treffen sich, wie die Pfeile in Fig. 53 andeuten, zwei Ströme von entgegengesetzter Richtung, die sich gegenseitig schwächen. Von a c fließt der Strom nach unten in die Brücke hinein, von a d nach oben. Es ist daher die Möglichkeit vorhanden, daß durch die Brücke ein Strom von der Stärke Null, d. h. gar kein Strom fließt, während sonst das ganze System von Strömen durchflossen ist. Es wird diese Möglichkeit davon abhängen, wie sich die Widerstände in den vier Teilen a d, a c, b d und b c zueinander

verhalten, ganz so, wie es bei der Wasserströmung auf die Stellung der Hähne ankommt. Dies läßt sich hier aus unserer Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes für Drahtstücke genau präzisieren.

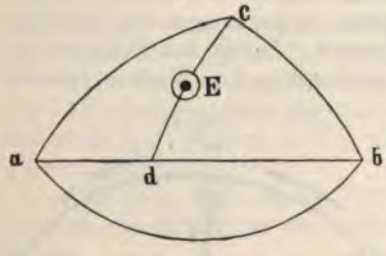
In welchem Fall wird durch die Brücke kein Strom fließen?

Wenn durch die Brücke c d kein Strom fließen soll, so muß die Spannung an c gleich der Spannung an d sein, denn nur dann fließt kein Strom durch c d. Daher muß dann auch der Spannungsverlust auf dem Wege a c gleich dem auf dem Wege a d, und der Spannungsverlust auf dem Wege c b gleich dem auf dem Wege d b sein. Da nun durch die Brücke kein Strom fließen soll, so können wir uns diesen Draht ganz entfernt denken und daher muß auch die Stromstärke in a c gleich der in c b sein, und ebenso die in a d gleich der in d b. Daraus ergibt sich sofort, daß, wenn in der Brücke kein Strom fließen soll, die Beziehung bestehen muß:

$$\frac{\text{Widerstand von a c}}{\text{Widerstand von a d}} = \frac{\text{Widerstand von c b}}{\text{Widerstand von d b}}.$$

Man erkennt daraus leicht, daß es möglich ist, auf diese Weise den Widerstand eines Drahtes mit dem eines anderen zu vergleichen, eine Methode, die wir im folgenden zu beschreiben haben werden. Sie ist zuerst von Wheatstone angegeben worden, und daher heißt diese ganze Art von Stromverzweigung die Wheatstonesche Brücke. Die Wheatstonesche Drahtkombination läßt sich auch so auffassen, daß vier Punkte a, d, b, c je mit einem Leiter verbunden sind a d, d b, b c, c a. Die vier Punkte bilden dann die vier Ecken eines Vierecks, dessen Seiten eben a d, d b, b c und c a sind. Je zwei gegenüberliegende Eckpunkte eines Vierecks werden nun durch die Diagonalen verbunden. Die eine Diagonale (zwischen c und d) ist also die Brücke, in der anderen Diagonale zwischen a und b befindet sich das Element. Wenn also die Widerstände der vier Seiten des Vierecks in dem oben eruierten Verhältnis stehen, so fließt in der einen Diagonale kein Strom, wenn in der anderen sich ein Element befindet. Die beiden Diagonalen sind aber gleichwertig. Folglich können wir auch in die Brücke c d unser Element E bringen. Dann fließt unter den angegebenen Verhältnissen im Zweig a b kein Strom. Diese Anordnung der Wheatstoneschen Kombination, die oft benutzt wird, ist in Fig. 54 gezeichnet.

Fig. 54.

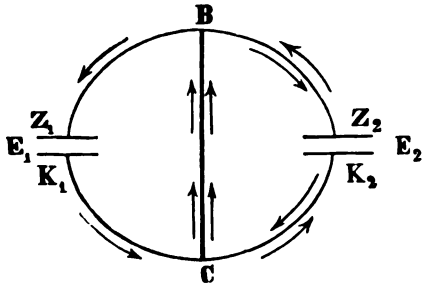


Eine noch weitergehende Komplikation kann man in die Stromverzweigung dadurch einführen, daß man in einzelne Zweige noch galvanische Elemente einführt, die von sich aus wieder Ströme erzeugen. Wenn in einem Zweig eines verzweigten Stromkreises noch ein Element sich befindet, so wird die Elektrizität durch diesen Zweig nicht bloß vermöge des von außen herrührenden Spannungsunterschiedes seiner Endpunkte hindurchgetrieben, sondern auch durch die in ihm herr-

schende elektromotorische Kraft. Wirken der Spannungsunterschied und die elektromotorische Kraft nach derselben Richtung, so hängt die Stromstärke in diesem Zweig ab von der Summe dieser beiden Größen. Wirken sie einander entgegen, so hängt die Stromstärke ab von ihrer Differenz und in beiden Fällen von dem Gesamtwiderstand des Zweiges.

Ein für das folgende wichtiges Beispiel für diese Stromverzweigung ist in Fig. 55 gezeichnet. Darin sind $K_1 Z_1$ und $K_2 Z_2$ zwei Elemente, von denen wir annehmen wollen, daß das zweite eine kleinere elektromotorische Kraft, E_2, hat als das erste, E_1. Diese beiden Elemente seien nun so geschaltet, daß die positiven Pole K_1 und K_2 miteinander und ebenso die negativen Pole Z_1 und Z_2 miteinander verbunden sind. Außerdem sei zwischen zwei beliebigen Punkten B und C wieder eine Brücke angebracht. Die Pfeile zeigen, daß in dem Zweig $B E_2 C$ (mit kleinerer elektromotorischer Kraft) sich zwei Ströme entgegenfließen, und es wird daher die Möglichkeit vorhanden sein, daß in diesem Zweig die Stromstärke Null ist. Unter welchen Verhältnissen kann nun die Stromstärke im Zweige $B E_2 C$ gleich Null sein? Wenn das der Fall sein soll, dann muß der Spannungsunterschied an den Punkten B und C gerade gleich der elektromotorischen Kraft E_2 sein. Daher muß die Stromstärke im Zweige B C gleich der elektromotorischen Kraft von E_2 dividiert durch den Widerstand von B C sein. Andererseits aber können wir, da im Zweige $B E_2 C$ kein Strom fließen soll, uns diesen jetzt ganz fortgelassen denken. Dann fließt im geschlossenen Kreise $B E_1 C B$ ein einziger Strom, es muß also die Stromstärke in B C nach dem Ohmschen Gesetz auch gleich der elektromotorischen Kraft von E_1 dividiert durch den ganzen Widerstand $B E_1 C + B C$ sein.

Fig. 55.



So findet man, daß dann die elektromotorischen Kräfte von E_1 und E_2 sich verhalten müssen wie die Widerstände einerseits von $B E_1 C B$, andererseits von B C. Es ergibt sich also

$$\frac{\text{elektromotorische Kraft von } E_1}{\text{elektromotorische Kraft von } E_2} = \frac{\text{Widerstand von } B E_1 C B}{\text{Widerstand von } B C}.$$

Daraus werden wir später eine Methode entnehmen, um elektromotorische Kräfte miteinander zu vergleichen.

Auf dieselbe Weise, wie es in diesen drei speziellen Fällen geschehen ist, kann man in jedem beliebig komplizierten Fall der Stromverzweigung sich in die Verhältnisse der Stromstärken eine Einsicht verschaffen. Man braucht nur immer für jeden Zweig eines Stromkreises den Spannungsverlust nach der oben gegebenen Definition zu bestimmen. Daß man auf diese Weise die Eigenschaften der verzweigten Ströme finden kann, hat zuerst Kirchhoff gezeigt.

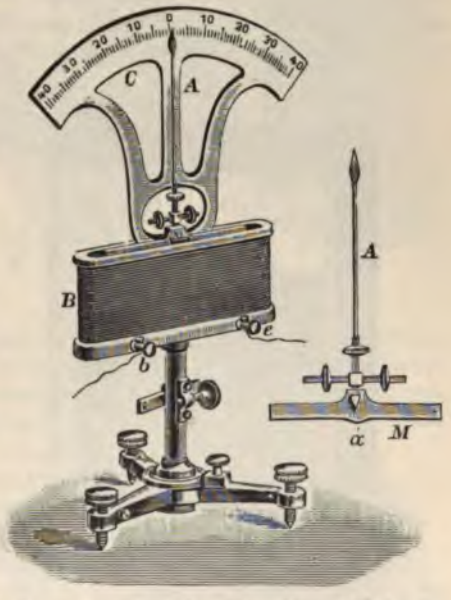
Mit den bisher besprochenen Gesetzen sind die Grundgesetze des galvanischen Stromes, soweit sie seine Stärke, deren Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft der Kette und vom Widerstand des gesamten Schließungskreises betreffen, vollkommen bekannt. Auf diesen Gesetzen basieren die quantitativen Anwendungen des elektrischen Stromes. Um nun aber nicht bloß im allgemeinen qualitativ, sondern im speziellen quantitativ mit Stromstärken, elektromotorischen Kräften und Widerständen rechnen zu können, sind zuerst Meßmethoden für diese elektrischen Größen anzugeben.

4. Kapitel.

Elektrische Apparate und Messungen.

Drei Größen sind es, die bei jedem galvanischen Strom in Betracht kommen, die elektromotorische Kraft, der Widerstand und die Stromstärke. Um mit diesen so einfach und sicher operieren zu können, wie wir es etwa mit Längen, mit Gewichten, mit der Zeit tun, ist es notwendig, daß wir diese drei Größen immer in bestimmten Einheiten ausdrücken und daß wir sie ebenso leicht und sicher messen können, wie wir Längen, Gewichte, Zeiten messen. So wie wir dazu besondere Apparate brauchen, Metermaßstäbe, Wagen, Uhren, so brauchen wir natürlich auch für die elektrischen Messungen gewisse Apparate, die zunächst besprochen werden sollen.

Fig. 56.



Zuvörderst haben wir Instrumente nötig, welche das Vorhandensein eines elektrischen Stromes anzeigen, ohne daß eine genaue Messung seiner Stärke nötig ist, und insbesondere Instrumente, welche schon sehr schwache Ströme anzeigen. Solche Apparate nennt man, wie schon früher erwähnt, Galvanoskope. Sie beruhen zum Teil darauf, daß ein elektrischer Strom, der in Windungen um eine Magnetnadel herumgeführt wird und zwar parallel zu ihr, diese Magnetnadel aus ihrer gewöhnlichen Nord-Südlage herausdreht. In je mehr Windungen der Strom um die Magnetnadel herumgeführt ist und je näher der Strom bei der Nadel vorbeifließt, um so stärker ist diese Wirkung, um so schwächere Ströme werden also schon dadurch angezeigt.

Ein sehr brauchbares Galvanoskop, bei dem der Magnet sich um eine horizontale Achse drehen kann, zeigt Fig. 56, ein sogenanntes Vertikalgalvanoskop. Man sieht in der Figur nebenbei den Magnetstab M besonders gezeichnet, der mit der Schneide α auf eine Unterlage im Innern des Galvanoskops aufgesetzt wird und so sich um eine horizontale Achse drehen kann. An dem Magneten ist ein Zeiger A, gewöhnlich aus Aluminium, befestigt. Das eigentliche Galvanoskop besitzt einen Rahmen B,

der mit einem Draht, parallel zum Magnetstab, vielfach umwunden ist. Die Enden des Drahtes gehen in die Klemmschrauben b und e. Innerhalb der Drahtwindungen ist der Magnet so aufgesetzt, daß er um eine horizontale Achse drehbar ist, und sowie ein Strom durch die Drahtwindungen geht, dreht sich der Magnet und der Zeiger A spielt vor der Skala C.

Fig. 57.

Solche Galvanoskope mit vielen Windungen nennt man auch Multiplikatoren. Um Luftströmungen zu vermeiden, sind die Galvanoskope gewöhnlich mit einem Glasgehäuse umgeben.

Fig. 57 zeigt ein ähnliches Vertikalgalvanoskop, welches bei dem Telegraphendienst der Reichspost eingeführt ist. Seine Einrichtung ist nach dem vorhergehenden von selbst verständlich.

Diejenigen Galvanoskope, die nicht bloß zum Anzeigen der Ströme, sondern zu wirklichen Messungen der Stromstärke benutzt werden können, nennt man Galvanometer. Man kann diese nach demselben Prinzip konstruieren, wie die eben erwähnten Galvanoskope, oder man kann, wie bei dem S. 60 angeführten Federgalvanometer, die Wirkung einer Drahtrolle auf einen Eisenstab benutzen, welche darin besteht, daß der Eisenstab in die Höhlung der Drahtrolle hineingezogen wird. Meistenteils werden jetzt aber die Galvanometer so konstruiert, daß man die Drehungen benutzt, die eine bewegliche Drahtrolle, in welcher der zu untersuchende Strom fließt, unter dem Einfluß eines starken Magneten ausführt.

Fig. 58.

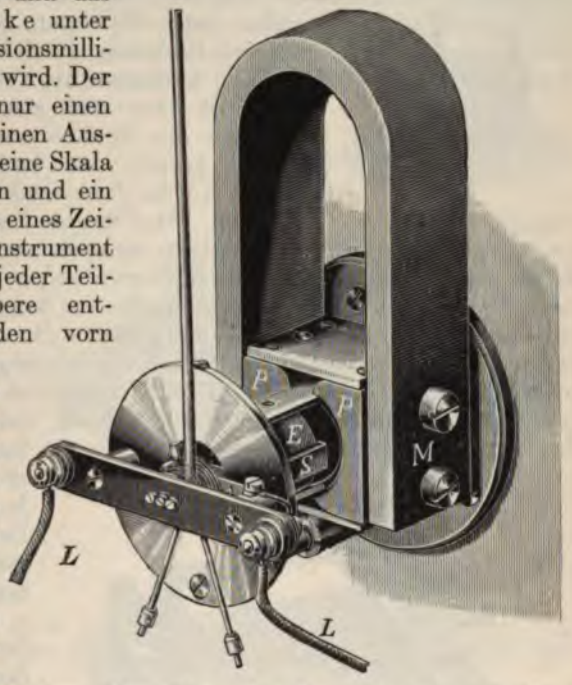
1:6

Ein für Demonstrationen geeignetes Galvanometer, welches die Einrichtung desselben erkennen läßt, ist das in Fig. 58 abgebildete Spulengalvanometer von Hartmann & Braun. In Fig. 59 sind die Hauptteile desselben vergrößert und herausgeschoben gezeichnet. Man sieht da einen vertikal stehenden Hufeisenmagnet M, an welchem ausgehöhlte Eisenstücke P, sogenannte Polschuhe, angebracht sind, die in ihre Höhlung den beweglichen Stromkreis aufnehmen. In der Höhlung befindet sich aber zunächst fest ein Eisenzylinder E und in dem Zwischenraum zwischen diesem und den Polschuhen dreht sich eine flache rechteckige Drahtspule S, welche an den vorn sichtbaren Federn befestigt ist und durch die Drähte L L den Strom zugeführt erhält. Mit der beweglichen Spule ist

ein Zeiger fest verbunden, welcher, wie man in Fig. 58 sieht, sich vor einer Skala drehen kann.

Nach demselben Prinzip, das hier nur kurz angedeutet ist, in Kapitel 7 aber ausführlicher dargelegt wird, ist ein Meßinstrument konstruiert, das in Fig. 60 in seiner äußeren Ansicht abgebildet ist, und das von Siemens & Halske unter dem Namen „Präzisionsmilliamperemeter" verbreitet wird. Der äußere Anblick zeigt nur einen Schutzkasten, welcher einen Ausschnitt trägt, durch den eine Skala von 0 bis 150 Teilstrichen und ein bei Null stehendes Ende eines Zeigers sichtbar ist. Das Instrument ist so eingerichtet, daß jeder Teilstrich einem Milliampere entspricht. In die beiden vorn am Gehäuse sichtbaren Klemmen werden die Drähte eingeschaltet, durch welche der zu messende Strom fließt, und das Instrument erlaubt sofort die Stärke dieses Stromes in Milliampere abzulesen.

Fig. 59



Wir müssen uns ferner mit einigen Hilfsapparaten vertraut machen, die bei elektrischen Versuchen häufig gebraucht werden.

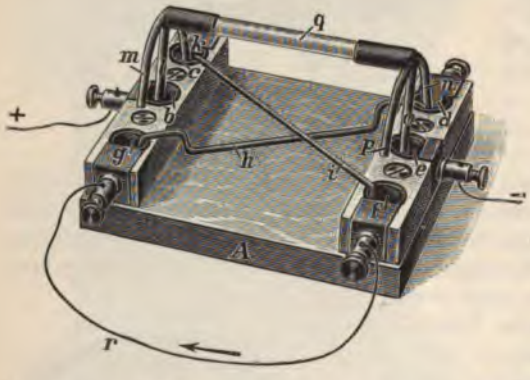
Oft will man bei elektrischen Untersuchungen den galvanischen Strom in einem Stromkreis rasch unterbrechen, ohne langwierige Prozeduren, vielmehr durch eine einzige Bewegung. Die einfachste Vorrichtung dazu besteht, wie Fig. 61 zeigt, aus einem kleinen Brett aus Holz oder Paraffin, in welches zwei Vertiefungen (a und b) gebohrt sind, die mit Quecksilber gefüllt werden. In die Quecksilbernäpfe tauchen Drähte ein, die mit den Klemmschrauben c und d verbunden sind. Ein mit einem Stück Kautschukschlauch umgebener Kupferbügel e kann mit seinen Enden in die Quecksilbernäpfe getaucht oder aus ihnen herausgenommen werden. Führt man also die Leitung von dem einen Pol eines Elementes nach c und von d weiter zu dem anderen Pol, so wird der Strom durch Einsetzen des Bügels geschlossen, durch Herausnehmen geöffnet.

Fig. 60.

Ferner ist es oft erwünscht, die Stromrichtung in einem Apparat rasch umkehren zu können. Wenn man z. B. ein Galvanoskop mit einem Element verbindet, so fließt der Strom (d. h. immer der positive Strom) in einer bestimmten Richtung durch die Windungen des Galvanoskops, je nachdem man den positiven Pol mit dem einen oder mit dem anderen Ende der Windungen verbunden hat. Will man den Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Windungen fließen lassen, so muß man die Verbindung der Pole wechseln. Dies kann man zwar durch Aus- und Einschrauben der Drähte erreichen, was aber Mühe und Zeit kostet. Man hat deshalb Apparate konstruiert, welche diese Umkehrung durch eine Bewegung vorzunehmen gestatten. Man nennt diese Apparate Kommutatoren. Der einfachste und am meisten benutzte Apparat für diesen Zweck ist der Pohlsche Kommutator, Fig. 62. Er besteht aus einer Unterlage von Holz oder Paraffin, in welche sechs Eisennäpfchen eingelassen sind, die mit Quecksilber gefüllt sind. In diese Näpfchen taucht nun ein beweglicher Bügel ein, der aus einem Glasstab q besteht, an dessen beiden Enden je ein metallener Dreifuß angekittet ist. Die mittleren Füße tauchen in die mittleren Quecksilbernäpfchen, von den äußeren kann bald das eine Paar, bald das andere Paar in die ihm entsprechenden Näpfchen eingetaucht werden. Je zwei gegenüberliegende Ecknäpfchen d g und c f sind durch Drähte h und i miteinander verbunden.

Fig. 61.

Fig. 62.



Um den Apparat zu benutzen, führt man von dem Element Drähte zu den Mittelklemmen, die mit den Näpfchen b und e verbunden sind, während man die Enden des Drahtes r, in welchem der Strom rasch umgekehrt werden soll, in die mit den Quecksilbernäpfchen f und g verbundenen Klemmen einführt. Dann sind, je nach der Lage des Bügels, die Näpfe b und e mit den Näpfen g und f entweder direkt oder übers Kreuz verbunden. Bei der in der Figur gezeichneten Lage des Bügels ist nun der Weg des Stromes folgender:

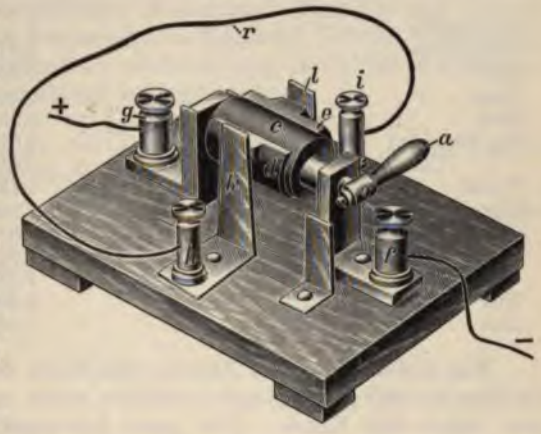
Vom positiven Pol des Elementes nach b, dann durch c, i, f, dann durch den Draht r in Richtung des Pfeiles nach g und durch h, d, e und von dort zum negativen Pol des Elementes.

Legt man aber jetzt den Bügel um, so ist der Weg des Stromes folgender: Vom positiven Pol des Elementes nach b, durch g zum Draht r und durch diesen entgegen der Richtung des Pfeiles nach f und e, und von dort zum negativen Pol des Elementes.

Man hat also durch bloßes Umlegen des Bügels bewirkt, daß der Strom im Draht r das eine Mal in entgegengesetzter Richtung floß wie das zweite Mal.

Ein anderer häufig benutzter Kommutator ist der in Fig. 63 abgebildete Foucaultsche. Seine Wirkungsweise beruht darauf, daß zwei Metallwülste e und d, die sich auf einem Ebonitzylinder c befinden, gegen die Metallbleche l und k gedrückt werden und zwar entweder e gegen l und d gegen k, oder, durch eine Drehung des Zylinders, umgekehrt e gegen k und d gegen l. Die metallische Achse des Zylinders ist nämlich in der Mitte unterbrochen und ein Teil steht mit d, der andere mit e in leitender Verbindung. Die Wirkung des Kommutators ist sonst aus der Figur leicht verständlich. Liegt der Zylinder, wie in der Figur gezeichnet ist, so geht der positive Strom von g durch das metallene Lager b nach dem Wulst e, dann durch l zu i und durch den Draht r von i zu h, dann durch k zu d und durch die Achse zu f.

Fig. 63.



Wird der Zylinder aber umgedreht, so geht der Strom von g durch b zu e und von e durch k zu h, dann durch den Draht r von h zu i und dann durch l, d, a, f weiter zum Element zurück.

Im Draht r hat also der Strom das eine Mal die entgegengesetzte Richtung wie das andere Mal.

Ist der Zylinder so gestellt, daß e und d gerade sich oben und unten befinden, also nicht gegen k und l drücken, so ist der Strom ganz unterbrochen, da der Zylinder sonst ganz nichtleitend ist.

Mit diesen experimentellen Hilfsmitteln ausgestattet, gehen wir nun zunächst zur näheren Untersuchung des elektrischen Widerstandes der Körper.

Der Widerstand eines Drahtes hängt, wie wir oben S. 62 f. sahen, ab von seiner Länge, seinem Querschnitt und von seinem Material. Es hat also ein jeder Stoff seine bestimmte Zahl, seinen spezifischen Widerstand, welcher angibt, wievielmal der Widerstand eines Drahtes von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt aus diesem Material größer oder kleiner ist als der Widerstand z. B. einer Quecksilbersäule von derselben Länge und demselben Querschnitt. Diese Zahl ist der spezifische Widerstand der betreffenden Substanz, bezogen auf Quecksilber. Das Umgekehrte des betreffenden Widerstandes nennt man die spezifische Leitungsfähigkeit (ebenfalls bezogen auf Quecksilber). Ist also z. B. der spezifische Widerstand von Aluminium

0,027, so ist die spezifische Leitungsfähigkeit desselben $\frac{1}{0{,}027} = 37$, d. h. Aluminium leitet den Strom 37mal so gut wie Quecksilber.

In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Widerstände und die spezifischen Leitungsfähigkeiten einer Reihe von festen Leitern angegeben, bezogen auf Quecksilber (Hg) als Einheit.

Namen der Leiter	Spezifischer Widerstand (Hg = 1)	Spezifische Leitungsfähigkeit (Hg = 1)
Quecksilber	1	1
Aluminium	0,027	37,0
Blei	0,2083	4,80
Eisen	0,1034	9,67
Gold	0,02183	45,8
Kupfer (rein)	0,0162	61,8
„ (käuflich)	0,01754	57,0
Nickel	0,1319	7,58
Platin	0,06944	14,4
Silber (weich)	0,01597	62,6
„ (hart)	0,01730	57,8
Wismut	1,389	0,72
Zink	0,0599	16,7
Zinn	0,1400	7,14

Man sieht aus diesen Zahlen, daß Silber den Strom am besten leitet, nachher kommt gleich Kupfer, welches, wenn es sehr rein ist, fast ebenso gut leitet wie Silber. Die gute Leitungsfähigkeit des Kupfers ist der Grund, warum man für den Durchgang von elektrischen Strömen meistens Kupferdrähte nimmt. Für lange Leitungen, für Telegraphenleitungen, ist das Kupfer allerdings zu teuer, und man bedient sich dann der Eisen- oder Bronzedrähte, deren Kosten viel geringer, deren Leitungsfähigkeit aber auch nur ungefähr der sechste Teil von der des Kupfers ist.

Wegen der praktischen Anwendungen ist noch der Widerstand einiger Kohlen und Metalllegierungen in der folgenden Tabelle angeführt:

Namen der Leiter	Spezifischer Widerstand (Hg = 1)	Spezifische Leitungsfähigkeit (Hg = 1)
Graphit	12,0	0,083
Gaskohle	67,6	0,015
Konstantan	0,53	1,90
Neusilber	0,3184	3,14
Nickelin	0,455—0,555	2,2—1,8
Rheotan	0,50	2,0
Patentnickel	0,364	2,75
Platinsilber	0,261	3,83
Mangankupfer 12proz.	0,460	2,194
Mangankupfer 30proz.	1,135	0,881
Nickelmangankupfer (Manganin)	0,498	2,007

Graphit und Gaskohle leiten den elektrischen Strom siebenhundert-, ja viertausendmal schlechter als Kupfer, trotzdem sind sie noch ganz gute Elektrizitätsleiter.

Da ein Ohm gleich dem Widerstand einer Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und 1 qmm Querschnitt ist (oben S. 64), so können wir aus den obigen Zahlen entnehmen, wie groß der Widerstand (in Ohm) eines beliebigen Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt ist. Ein solcher Draht aus Quecksilber hat nämlich den Widerstand $\frac{1}{1{,}063}$ = 0,94073 Ohm. Für jedes andere Material erhalten wir also den Widerstand eines Drahtes von solcher Länge und solchem Querschnitt, indem wir diese Zahl mit dem spezifischen Widerstand (bezogen auf Quecksilber) multiplizieren. Diese Zahlen sind in folgender Tabelle, abgerundet in gewöhnlichen Brüchen, enthalten, wodurch man rasch den Widerstand eines beliebigen Drahtes angenähert schätzen kann.

Widerstand (in Ohm) eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt.

Name:	Widerstand in Ohm abgerundet:
Aluminium	1/39
Blei	1/5
Eisen	1/12
Gold	1/49
Kupfer	1/61
Nickel	1/9
Platin	1/16
Silber (weich)	1/66
„ (hart)	1/62
Wismut	1 1/5
Zink	1/18
Zinn	1/8
Neusilber	1/4
Nickelin	1/3
Manganin	1/3

Daraus kann man also z. B. leicht berechnen, daß ein Kupferdraht von 465 cm Länge und 1/2 qmm Querschnitt den Widerstand von $\frac{4{,}65}{1/2} \cdot \frac{1}{61} = 0{,}152$ Ohm hat, während ein Draht aus Manganin von derselben Länge und demselben Querschnitt den Widerstand $\frac{4{,}65}{1/2} \cdot \frac{1}{3} = 3{,}1$ Ohm besitzt.

Wenn man die spezifischen Leitungsfähigkeiten der Substanzen bezogen auf Quecksilber kennt, so kann man auch, wie es jetzt gewöhnlich geschieht, den Widerstand angeben, den ein Würfel aus der betreffenden Substanz von 1 cm Seitenlänge besitzt. Man nennt einen solchen Würfel einen Zentimeterwürfel. Da dessen Länge 1 cm und dessen Querschnitt 1 qcm ist, so hat ein solcher Würfel, wenn er aus Queck-

silber ist, den Widerstand $0{,}94073 \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{100} = \frac{0{,}94073}{10000}$ Ohm. Wenn man für 1 Millionstel Ohm die Bezeichnung 1 Mikrohm einführt, so hat ein solcher Zentimeterwürfel Quecksilber also den Widerstand 94,073 Mikrohm. Für jede andere Substanz erhalten wir also den Widerstand eines Zentimeterwürfels, wenn wir diese Zahl mit dem spezifischen Widerstand (bezogen auf Quecksilber) multiplizieren. Diese Zahlen bezeichnet man auch als den Widerstandskoeffizienten der betreffenden Substanz. Man braucht dann, um von einem Draht den Widerstand berechnen zu können, diese Zahl nur mit der Länge des Drahtes in Zentimetern zu multiplizieren und durch den Querschnitt des Drahtes in Quadratzentimetern zu dividieren. Danach enthält folgende Tabelle die Widerstandskoeffizienten für eine Reihe von Metallen und Legierungen.

Widerstand eines Zentimeterwürfels bei 0° in Mikrohm

Aluminium	2,70 Mikrohm	Zinn	13,18 Mikrohm
Blei	19,58 „	Graphit	1140 „
Eisen	9,725 „	Gaskohle	6200 „
Gold	2,06 „	Konstantan (Nickelkupfer)	50 „
Kupfer (rein)	1,533 „	Neusilber	30 „
„ (käuflich)	1,652 „	Nickelin	43—51 „
Nickel	12,40 „	Patentnickel	34,2 „
Platin	9,03 „	Platinsilber	24,59 „
Quecksilber	94,073 „	Mangankupfer (12%)	43 „
Silber (weich)	1,499 „	„ (30%)	107 „
„ (hart)	6,626 „	Manganin	47 „
Wismut	31,25 „		
Zink	5,61 „		

Es sind in den obigen Tabellen nur Leiter erster Klasse — Metalle und Kohle — enthalten. Die Flüssigkeiten, die überhaupt den elektrischen Strom leiten, sind Leiter zweiter Klasse (außer dem Quecksilber) und der Widerstand, den sie dem Durchgang eines Stromes entgegensetzen, ist immer sehr viel größer als der der Metalle. Die meisten untersuchten Flüssigkeiten sind Lösungen von Salzen und Säuren in Wasser. Die spezifische Leitungsfähigkeit derselben hängt von ihrer Konzentration ab, sie ist eine andere bei einer Kupfervitriollösung, die 5 Proz. Kupfervitriol enthält, als bei einer, die 20 Proz. enthält. Außerdem hängt die Leitungsfähigkeit bei den Flüssigkeiten ebenso wie bei den Metallen von der Temperatur ab. Die folgenden Zahlen beziehen sich auf die Temperatur von 18° C. und geben erstens die spezifische Leitungsfähigkeit auf Quecksilber als Einheit bezogen, ferner den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohm und drittens das Reziproke der letzteren Größe, welches man schlechtweg die Leitfähigkeit der Substanz nennt.

Vollkommen reines Wasser leitet den elektrischen Strom fast gar nicht, ist also ein fast vollkommener Isolator. Aber die geringsten Beimengungen von fremden Stoffen genügen schon, um Wasser ziemlich gut leitend zu machen.

Name der Flüssigkeit	Spezifische Leitungsfähigkeit (Hg = 1)	Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohm	Leitfähigkeit
Schwefelsäure von 30,4 Proz.	0,00006914	1,35	0,7398
Bittersalzlösung mit 17,3 Proz. Bittersalz	0,00000456	20,3	0,04922
Zinkvitriollösung mit 23,7 Proz. Zinkvitriol	0,00000452	20,9	0,0480
Kochsalzlösung mit Kochsalz gesättigt .	0,00002015	4,63	0,2160
Essigsäure von 16,6 Proz.	0,000000152	625,0	0,00160

Trotzdem die Flüssigkeiten den Strom sehr viel schlechter leiten als die Metalle, sind sie doch noch sehr gute Leiter gegenüber den eigentlichen Isolatoren, von denen wir ja wissen, daß sie ebenfalls, wenn auch in minimalster Weise, leitend sind. Genaue Zahlen über die spezifische Leitungsfähigkeit der Isolatoren anzugeben, ist nicht möglich, weil die Stromleitung bei ihnen nicht in der einfachen Weise vor sich geht, wie sie durch das Ohmsche Gesetz charakterisiert ist. Es sind daher in der folgenden Tabelle für einige Isolatoren nur ungefähre Zahlenangaben gemacht und zwar geben diese den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Millionen Ohm, wofür man die Bezeichnung Megohm eingeführt hat.

Name des Isolators:	Widerstand eines Zentimeterwürfels in Megohm:
Zelluloid	75000
Glas (trocken)	8000000
Glimmer	2300000
Hartgummi	4200000000
Paraffin	3000000000
Stabilit	24000000
Vulkanfiber	53
Olivenöl	1000000
Benzol	1300

Die Leitungsfähigkeit aller Leiter, der Metalle sowohl wie der Flüssigkeiten, ist bei verschiedenen Temperaturen etwas verschieden. Hierbei findet aber ein wesentlicher Unterschied zwischen Metallen und Flüssigkeiten statt. Bei Metallen nämlich wird die Leitungsfähigkeit bei höherer Temperatur schlechter, bei Flüssigkeiten wird sie besser. Metalle setzen also bei höherer Temperatur dem galvanischen Strom einen größeren Widerstand entgegen, Flüssigkeiten einen kleineren. Wie die Metalle verhält sich auch Quecksilber, welches ja ein Metall ist, wie die Flüssigkeiten dagegen Kohle. Der Widerstand der Kohle nimmt ab bei höherer Temperatur. Der Widerstand wächst bei den meisten reinen Metallen mit steigender Temperatur um nahezu gleich viel, nämlich für jeden Grad ungefähr um $^1/_3$ Proz. Die Metalllegierungen aber verhalten sich anders. Patentnickel und Nickelin ändern ihren Widerstand viel weniger, wenn die Temperatur wächst, und die oben erwähnten Legierungen Mangankupfer und Manganin und Konstantan fast gar nicht. Für nicht zu große Temperaturände-

rungen haben diese immer denselben Widerstand. Gerade deswegen werden sie, wie wir bald sehen werden, für Normalwiderstände benutzt.

Bei den Leitern zweiter Klasse nimmt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur bedeutend zu. Zum Beispiel hat die oben erwähnte Schwefelsäure bei 0^0 die Leitfähigkeit 0,5184, bei 30^0 aber schon 0,8860. Auch bei festen Salzen findet eine sehr bedeutende Zunahme der Leitfähigkeit statt, wenn die Temperatur steigt. Bei niedrigen Temperaturen sind sie fast Nichtleiter, aber bei Temperaturen in der Nähe ihres Schmelzpunktes werden sie sehr gute Leiter.

Eine besondere Eigentümlichkeit zeigt die Leitungsfähigkeit des Selens. Dieselbe wird nämlich beträchtlich größer, wenn das Selen von

Fig. 64.

Fig. 65.

Fig. 66.

Lichtstrahlen getroffen wird, als wenn es im Dunklen ist. Selen ist ein kristallinischer Körper, und es scheint durch den Einfluß des Lichtes eine Modifikation der Kristalle derart einzutreten, daß eben die Leitfähigkeit erhöht wird. Man konstruiert für diese Wirkung Selenzellen, wie sie in zwei gebräuchlichen Formen durch Fig. 64 und 65 dargestellt sind. Fig. 64 ist eine flache Selenzelle S, Fig. 65 eine zylindrische, wie sie von Ruhmer in Berlin hergestellt wird. In beiden Fällen wird das Selen in die Zwischenräume zwischen Messingdrähten eingebracht, welche entweder wie in Fig. 64 flach liegen, oder wie in Fig. 65 in vielen Windungen auf einem Zylinder angebracht sind. Das lichtempfindliche Selen wird durch Schmelzen bei ganz bestimmter Temperatur hergestellt. Die zylindrische

Zelle in Fig. 65 ist in eine Glasbirne eingesetzt, aus der die Luft ausgepumpt ist. Das eine Ende des Drahtes ist an das metallische Gewinde, das andere an den metallischen Boden dieser Birne geführt. Zur bequemen Benutzung wird die Birne Fig. 65 in ein Stativ eingeschraubt, wie Fig. 66 zeigt. Die beiden Klemmschrauben K_1 und K_2 stehen mit den beiden Enden der Selenzelle in leitender Verbindung. Im Dunklen hat eine solche Zelle z. B. einen Widerstand von zirka 10 000 Ohm, bei Belichtung mit Sonnenlicht nur einen von etwa 1000 Ohm. Man kann aber auch Zellen herstellen, deren Widerstand bei Belichtung in noch größerem Verhältnis abnimmt, bis auf $^1/_{100}$ des Wertes im Dunkeln.

Wenn zwei Leiter aneinander grenzen und die Elektrizität zwischen ihnen übergehen soll, so muß die Verbindung beider Leiter eine sehr gute sein, weil sonst der Strom einen sehr großen Widerstand an der Trennungsstelle findet. Am besten lötet man daher die Metalle aneinander. Gewöhnlich aber klemmt man die Enden zweier Drähte durch Schrauben fest, damit sie vollkommen Kontakt haben. Bei der Kohle insbesondere ist es sehr auffällig, wie sehr eine schlechte Berührung zweier Kohlen den Widerstand derselben erhöht. Ein ganz geringer Druck auf die Berührungsstelle zweier Kohlen verringert den Widerstand beim Übergang der Elektrizität aus der einen zur anderen schon sehr bedeutend. In dem Mikrophon, das im zweiten Teil dieses Werkes besprochen ist, ist davon eine sehr wichtige Anwendung gemacht.

Um nun Widerstände von Drähten in Ohm ausdrücken zu können, muß man zunächst einen abgemessenen Widerstand haben, der gerade 1 Ohm (abgekürzt 1 Ω) beträgt, so wie man einen Metermaßstab haben muß, um Längen in Metern messen zu können. Das Ohm, wie es jetzt in Deutschland gesetzlich eingeführt ist, ist bestimmt als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei der Temperatur 0°. Man nennt dieses auch wohl das internationale Ohm (int. Ω).

Fig. 67.

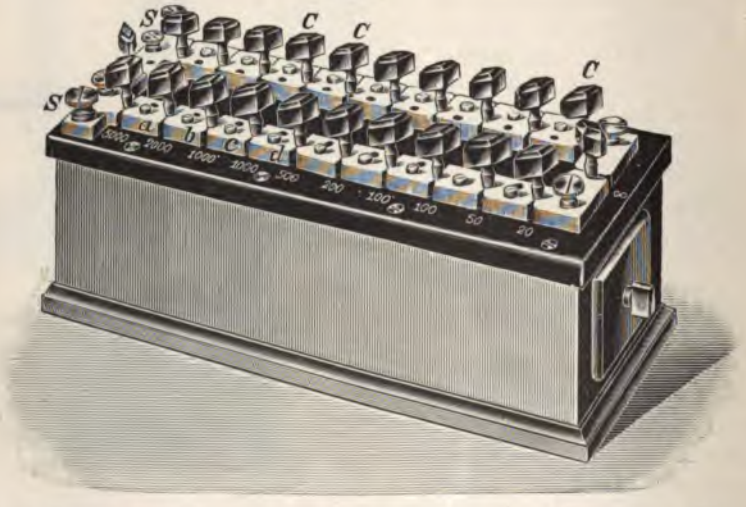
Normalwiderstände, welche genau 1 Ohm Widerstand haben, werden nach dem Modell der physikalischen Reichsanstalt in Berlin verfertigt. Ein solches Normalohm ist in Fig. 67 abgebildet. Die Normalwiderstände werden der Bequemlichkeit halber nicht direkt aus Quecksilbersäulen gemacht, sondern aus Drähten, deren Länge und Querschnitt so abgemessen ist, daß der ganze Draht genau denselben Widerstand hat wie eine Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Und zwar werden die Drähte aus Manganin gewählt, weil diese bei allen Tempe-

raturen zwischen 0^0 und 100^0 fast genau denselben Widerstand haben. Ein Normalohm besteht aus einer zylindrischen Büchse, welche mit Petroleum p gefüllt ist und einen Ebonitdeckel trägt. Im Inneren der Büchse, im Petroleum, befindet sich ein hohler Zylinder a, auf welchen der abgemessene Draht aufgewickelt ist. Das Petroleum kann durch die Löcher auch im Inneren des Zylinders zirkulieren. Ein eingestecktes feines Thermometer t gibt die Temperatur im Inneren an. Die Enden des Drahtes sind durch Schrauben und Lötung an den beiden gebogenen Kupferstäben e e von 7 mm Stärke befestigt, welche aus dem Deckel heraustreten und deren freie Enden in Quecksilbernäpfe getaucht werden, durch welche ein Strom in sie geführt werden kann. Die äußere Ansicht eines solchen Normalohms (ohne Thermometer) zeigt Fig. 68.

Fig. 68.

Es ist oft für elektrische Untersuchungen notwendig, eine Reihe von verschieden großen Widerständen zu haben, um sie in den Kreis eines Stromes einzuschalten, teils um dadurch den Strom auf eine gewünschte Stärke zu bringen, teils

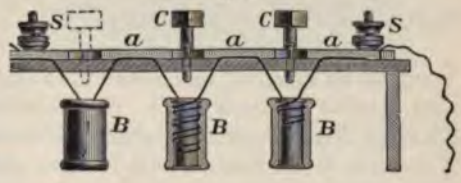
Fig. 69.



um unbekannte Widerstände mit bekannten vergleichen zu können. Es genügt dazu natürlich, wenn man eine Reihe von Drähten hat, deren Widerstände man genau kennt.

Zu diesem Zwecke hat zuerst Siemens eine Reihe von abgemessenen Widerständen in einem Kasten so angeordnet, daß sie einzeln oder zusammen leicht zu benutzen sind. Man nennt solche Apparate Widerstandskasten oder Stöpselrheostaten. Ein solcher ist in Fig. 69 in der äußeren Ansicht abgebildet. Auf dem Deckel des Kastens befindet sich eine Reihe von dicken Messingplatten a, b, c, d . . ., deren Ränder wenig voneinander entfernt sind und die bogenförmige Ausschnitte haben, so daß die Stöpsel C C zwischen sie fest eingeklemmt werden können. Jede Messingplatte ist nun mit der folgenden durch eine, im Inneren des Kastens liegende Drahtrolle verbunden, wie man in der Durchschnittszeichnung Fig. 70 sieht, und zwar haben die Drahtrollen alle bestimmte, gemessene Widerstände. C C . . . sind die Stöpsel, B B die Drahtrollen. Zwischen den aufeinander folgenden Messingplatten a a . . . sind gewöhnlich Widerstände von 0,1, 0,2, 0,2, 0,5, 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50 u. s. w. Ohm vorhanden. Der Strom wird durch die Klemmschrauben S zu- und abgeführt. Sind alle Stöpsel zwischen den Messingplatten eingeklemmt, so geht der Strom nur durch die Messingplatten hindurch, weil der Widerstand der gesamten Drähte im Kasten ein enorm großer ist gegen den der dicken Messingplatten. Ist dagegen ein Stöpsel, etwa der punktiert gezeichnete, herausgenommen, so fließt der Strom durch die Rolle B an dieser Stelle und kommt dann erst zur anderen Klemmschraube S. Durch die Herausnahme des Stöpsels ist also der bestimmte Widerstand eingeschaltet. So kann man durch Herausnehmen eines oder mehrerer oder aller Stöpsel Widerstände von 0,1 Ohm an bis zu der Summe aller im Apparat vorhandenen einschalten.

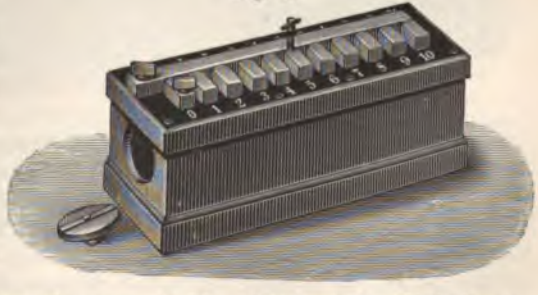
Fig. 70.



Diese Widerstandskasten werden bis zu 10 000 Ohm Widerstand konstruiert.

Für manche Zwecke werden diese Kasten so eingerichtet, daß in einem Kasten 10 gleiche Widerstände sich befinden (z. B. von je 1 Ohm oder von je 10 Ohm etc. bis zu je 100 000 Ohm). Diese nennt man deswegen Dekadenrheostaten. Sie besitzen, wie Fig. 71 zeigt, ebenfalls auf dem Deckel Messingklötze, deren je zwei benachbarte die beiden Enden eines der betreffenden Widerstände angelötet enthalten. Mit einem einzigen Stöpsel kann man dann die Widerstände vom 1- bis 10fachen der Einheit einschalten. Das Schema Fig. 72 zeigt die Verbindung an. Bei K_1 und K_2

Fig. 71.



werden die Drähte vom Element eingeklemmt, w_1, w_2 . . . sind die gleichen Widerstände. Steckt nun z. B. der Stöpsel im Loch 4 und ist die Einheit 10000 Ohm, so sind dabei 40000 Ohm in den Stromkreis eingeschaltet. Solche Dekadenwiderstände ordnet man auch häufig jetzt kreisförmig an und verbindet mehrere derselben in einem Kasten. Bei der kreisförmigen Anordnung kann man, statt durch Stöpsel Kontakt zu machen, vielmehr durch eine bewegliche Metallfeder, die durch eine Kurbel gedreht wird, die Einschaltung der Widerstände besorgen. So zeigt Fig. 73 einen Dekadenrheostatkasten mit Kurbelschaltung von Keiser & Schmidt in Berlin. Dieser besteht aus 5 hintereinander verbundenen Abteilungen. In jeder sind 9 gleiche Widerstände im Kreise angeordnet, und zwar in der ersten von je 0,1 Ohm, in der zweiten von je 1 Ohm, dann von je 10, 100 und je 1000 Ohm. In jeder kann man

Fig. 72.

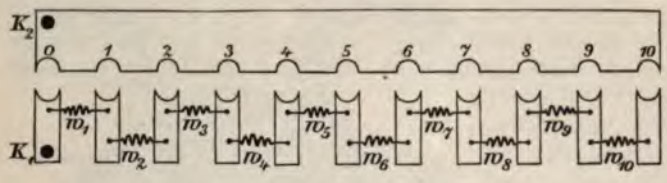
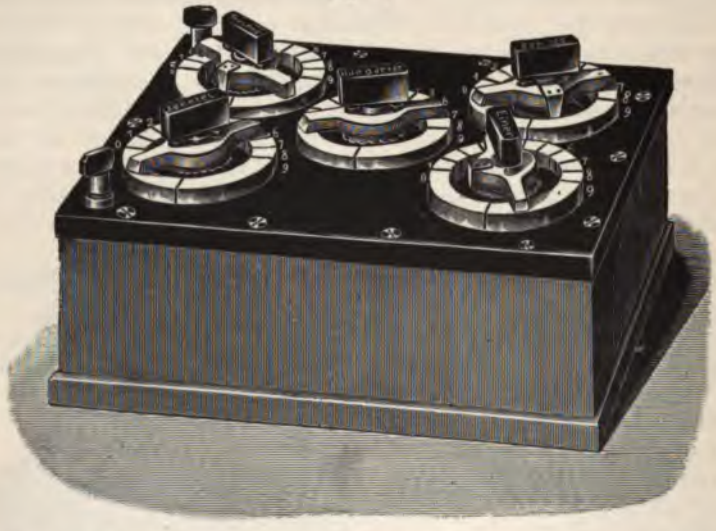


Fig. 73.



durch die Kurbel einen bestimmten Widerstand einschalten, so daß man von 0,1 Ohm bis zu 9999,9 Ohm stetig um je 0,1 Ohm fortschreiten kann.

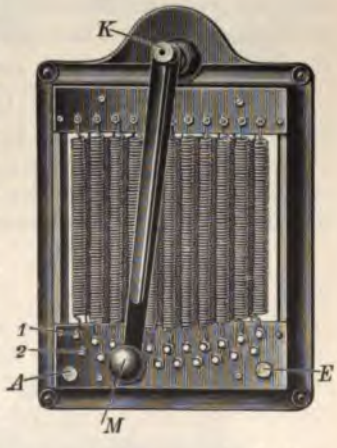
Die Widerstandskasten gestatten genau bestimmte und gemessene Widerstände in einen Stromkreis einzuschalten. Will man jedoch nur Widerstände rasch in einen Stromkreis einführen, ohne daß man ihre Größe genau zu kennen braucht, sogenannte Ballastwiderstände (was häufig vorkommt, namentlich wenn man die Stromstärke in einem Stromkreis auf eine bestimmte Größe bringen will), so eignen sich dafür

andere Apparate, sogenannte Kurbelrheostaten, gut, von denen einer in Fig. 74 abgebildet ist. Ein Neusilber- oder Nickelindraht ist schraubenförmig auf einen Marmorzylinder aufgewunden. Das eine Ende des Drahtes ist mit der Klemmschraube t leitend verbunden, das andere aber ist an dem Marmor befestigt. Durch Drehen des Marmorzylinders mittels der Kurbel h kann nun ein Messingröllchen z längs der Metallstange a b auf dem Draht gleiten. Die Metallstange und mit ihr das Röllchen ist mit der Klemmschraube s verbunden. In der Figur kann also ein elektrischer Strom aus einem Element bei t eingeführt werden, durch den Draht bis zum Röllchen z fließen, von diesem dann durch die Messingstange a b bis zur Klemmschraube s und dann zum Element zurückfließen. Auf diese Weise kann man durch Drehen der Kurbel h größere oder geringere Längen des Drahts in den Stromkreis einschalten.

Fig. 74.

Für starke Ströme (Ströme von mehreren Ampere) wendet man jetzt gewöhnlich Ballastwiderstände von der Form an, wie sie in Fig. 75 gezeichnet ist. Eine Reihe von Spiralen aus Konstantandraht sind in einem Rahmen befestigt. Das Ende der ersten Spirale geht in einen Kontaktknopf 1, der Anfang der zweiten Spirale in einen Knopf 2 aus und so fort. Alle diese sind metallisch verbunden. Auf diesen Knöpfen läßt sich eine starke Messingfeder durch die Kurbel M verschieben. Der eine Pol der Leitung ist mit der Klemme A und durch diese mit dem Drehpunkt K der Kurbel, also mit der Schleiffeder der Kurbel M, der andere Pol der Leitung ist mit der Klemme E verbunden. Bei jeder Stellung der Feder ist nun, wie man aus der Verbindung in der Figur erkennt, ein anderer Widerstand in den Stromkreis eingeführt. Wird die Kurbel auf den Anfangsknopf 1 gestellt, so sind alle Widerstände eingeschaltet, bei allmählichem Hineinschieben der Kurbel nach E zu sind immer weniger Widerstände in dem Stromkreis.

Fig. 75.



Nachdem wir uns so mit einigen Apparaten vertraut gemacht haben, können wir nun leicht experimentell den Widerstand eines jeden beliebigen Leiters messen und in Ohm ausdrücken. Man hat dazu verschiedene Methoden. Unter allen aber ist die bequemste, und daher auch am meisten angewendete, diejenige, welche man die Methode der Wheatstoneschen Brücke nennt. Sie beruht auf der Anwendung derjenigen Stromverzweigung, die wir früher betrachtet haben.

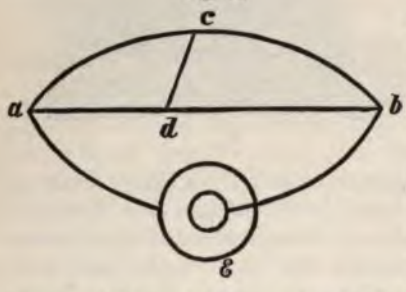
Wir haben oben S. 72 gesehen, daß, wenn wir von einem Element aus den Strom durch eine Leitung mit zwei Zweigen schicken, die

wiederum miteinander durch einen Draht, durch eine Brücke, verbunden sind, daß dann unter gewissen Umständen der Strom in der Brücke gleich Null wird. Diese Umstände treten, wie wir sahen, dann ein, wenn in Fig. 76

$$\frac{\text{Widerstand von a c}}{\text{Widerstand von c b}} = \frac{\text{Widerstand von a d}}{\text{Widerstand von d b}}$$

ist. Dann ist der Strom in dem Brückendraht immer gleich Null, wie groß auch der Widerstand des Brückendrahtes c d sein mag. Man kann deshalb in die Brücke auch ein Galvanoskop einschalten und durch dieses zugleich erkennen, wenn der Strom in der Brücke verschwindet.

Fig. 76.

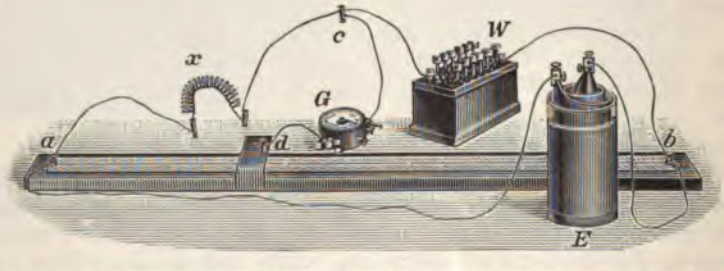


Will man nun den Widerstand eines Drahtes bestimmen, so bringt man ihn z. B. an die Stelle des Zweiges a c. Als Zweige a d und b d nimmt man einen gleichmäßig dicken Draht, auf dem ein beweglicher Kontakt d verschoben werden kann. Dieser Kontakt wird am besten aus einem Stahlklotz gebildet, der eine scharfe Kante besitzt und mit dieser auf dem Draht aufliegt. Der Draht selbst liegt auf einer Skala, so daß man die Länge von a d und b d ablesen kann. Endlich als Zweig c b nimmt man einen bekannten Widerstand, z. B. 1 Ohm. Und nun verschiebt man den Kontaktschlitten auf dem Draht a d b so lange, bis das Galvanoskop in c d nicht mehr abgelenkt ist. Dann geht kein Strom durch c d, und nun wissen wir, daß

$$\frac{\text{Widerstand des zu untersuchenden Drahtes}}{\text{1 Ohm}} = \frac{\text{Länge a d}}{\text{Länge d b}},$$

also der Widerstand des zu untersuchenden Drahtes = 1 Ohm × dem Verhältnis der Längen von a d und b d ist. Folglich haben wir den Widerstand des zu untersuchenden Drahtes in Ohm bestimmt. Die Verbindungen bei dieser Widerstandsmessung gehen deutlich aus Fig. 77 hervor. Darin

Fig. 77.



ist x der zu untersuchende Widerstand, w ein Widerstandskasten, aus dem ein bekannter Widerstand entnommen ist (in unserem Beispiel 1 Ohm). Zwischen a und b ist ein Platindraht über einer Skala ausgespannt. Bei d ist der verschiebbare Kontakt. E ist das Element und G das Galvanoskop.

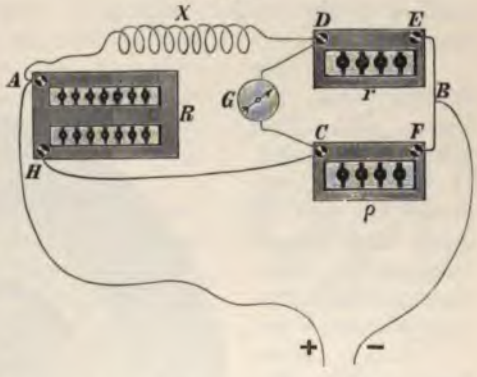
Diese Methode nennt man, wie schon erwähnt, die Methode der Wheatstoneschen Brücke.

Die nötigen Verbindungsdrähte von x und w miteinander und mit den Klemmen a und b müssen entweder so geringen Widerstand haben, daß man ihn vernachlässigen kann, oder ihr Widerstand muß bekannt sein. Auf die übrigen Verbindungsdrähte kommt es nicht an.

Bei dieser Methode ist es zunächst gleichgültig, wie groß der bekannte Widerstand w ist, mit dem der unbekannte x verglichen wird. Das Verhältnis der Drahtlängen a d und d b ist immer gleich dem Verhältnis der Widerstände x und w, wenn das Galvanoskop keinen Ausschlag zeigt. Tatsächlich aber liefert die Methode um so genauere Werte, je weniger verschieden die beiden Widerstände x und w sind. Hat man also einen Stöpselrheostaten zur Verfügung, so wird man erst eine provisorische Messung machen, um einen ungefähren Wert von x zu erhalten, und dann eine genaue Messung, indem man als bekannten Widerstand von w einen dem provisorisch bestimmten von x möglichst gleichen benutzt.

Man verwendet die Wheatstonesche Kombination noch auf andere Art zum Messen von Widerständen, wie das Schema in Fig. 78 zeigt. Vom Element geht der Strom nach den beiden Klemmen A und B und teilt sich hier, so daß er einmal durch den zu untersuchenden Widerstand x und einen kleinen Widerstandskasten r, andererseits durch einen großen Rheostaten R und einen anderen kleinen Widerstandskasten ρ geht. Zwischen C und D befindet sich die Brücke mit dem Galvanoskop G. Man schaltet z. B. bei r und ρ je 1 Ohm aus, so daß das Verhältnis der Widerstände B D und B C gleich 1 ist, und zieht aus R dann so lange Stöpsel heraus, bis in G kein Strom sich zeigt. Dann muß der aus R gezogene Widerstand gleich dem gesuchten sein. Macht man das Verhältnis der Widerstände B D und B C nicht gleich 1, sondern z. B. gleich 0,1, 0,01 oder gleich 10, 100, so ist auch der zu bestimmende Widerstand gleich 0,1-, 0,01- oder gleich 10-, 100mal dem ausgeschalteten Rheostatenwiderstand.

Fig. 78.

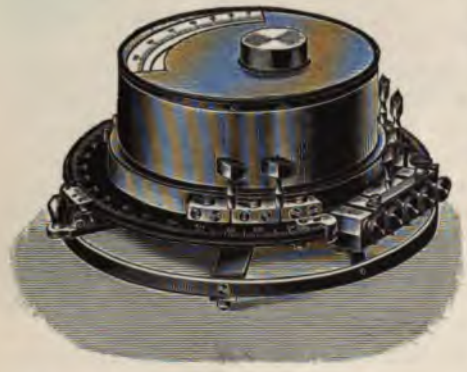


Da Widerstandsmessungen in der Elektrizitätslehre und ihre Anwendungen am häufigsten vorkommen, so hat man die dazu notwendigen Apparate möglichst handlich zusammenzubringen gesucht. Direkt für die Kombination der Wheatstoneschen Brücke ist das Siemenssche Universalgalvanometer eingerichtet, von dem in Fig. 79 die äußere Ansicht abgebildet ist und in das wir genauere Einsicht nehmen wollen.

Das Instrument enthält zunächst ein Galvanoskop, ein Milliamperemeter, wie das in Fig. 60 abgebildete. Dasselbe sitzt auf einer Schieferplatte, die in Fig. 80 besonders gezeichnet ist, in welcher das ganze Instrument

von oben gesehen abgebildet ist. Unterhalb der Schieferplatte befinden sich vier Widerstandsrollen von 1, 9, 90, 900 Ohm, die in bekannter Weise durch Stöpsel ein- und ausgeschaltet werden können, so daß man, indem man sie der Reihe nach herausnimmt, 1, 10, 100, 1000 Ohm eingeschaltet hat. In dem Rand der Schieferplatte befindet sich eine Nut und in diese ist ein Neusilberdraht von gleichförmigem Widerstand eingelegt, der als Meßdraht bei der Wheatstoneschen Brücke dient. Auf der Schieferplatte befindet sich eine Teilung, und zwar geht sie von der Mitte der hinteren Seite der Schieferplatte an nach beiden Seiten von 0 bis 150, oder bei anderer Ausführung gleich so, daß man das Verhältnis der Längen der beiden Abschnitte des Meßdrahtes direkt ablesen kann.

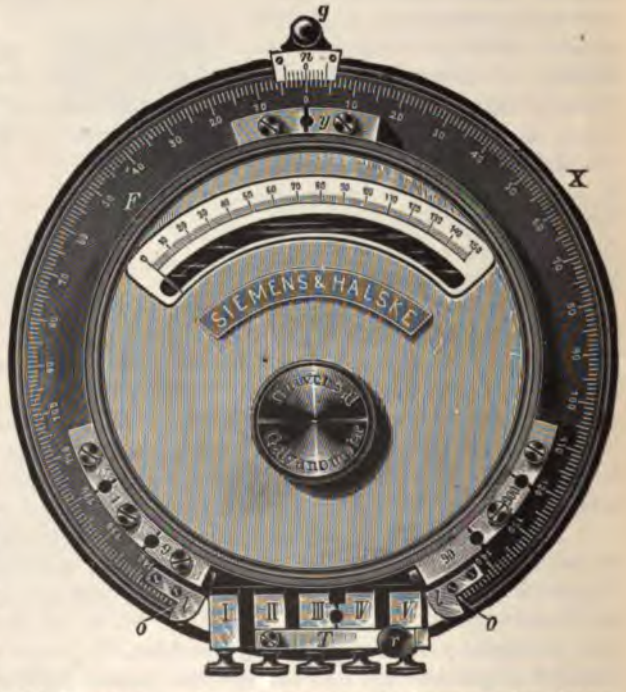
Fig. 79.



Unterhalb der Schieferplatte befinden sich fünf Klemmschrauben I, II, III, IV, V, von denen III und IV durch einen Stöpsel miteinander verbunden werden können, während V mit II durch einen Druck auf den Knopf r einer Feder T momentan in Verbindung gesetzt werden kann.

Endlich sitzt auf der Achse des Apparates drehbar der Arm g (den man deutlich in Fig. 79 sieht). Dieser trägt einen metallischen Kontakt, der den Meßdraht berührt und auf ihm verschoben werden kann.

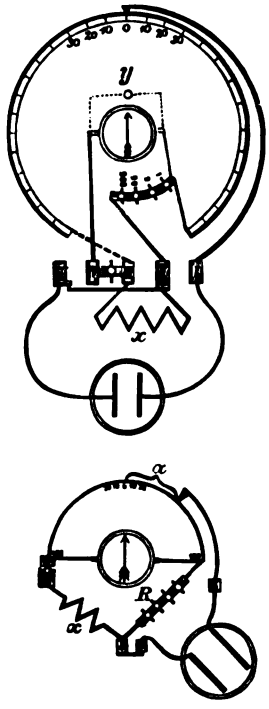
Fig. 80.



Die Verbindung der einzelnen Teile des Apparates und zugleich seine Einrichtung zur Wheatstoneschen Brücke ist nun aus Fig. 81

zu ersehen. Die beiden Pole des Elementes werden zwischen I und V eingeschaltet, der zu untersuchende Widerstand x zwischen II und III (mit welchem IV durch einen Stöpsel verbunden ist). Der Meßdraht steht einerseits in ständiger Verbindung mit den Widerständen 1, 9, 90, 900, und durch diese mit der Klemme II, andererseits mit der Klemme III, das Galvanometer ebenfalls mit den Widerständen und der Klemme IV. Der bewegliche Zeiger ist mit der Klemme I fest verbunden. In das Schema der Wheatstoneschen Brücke gebracht, reihen sich die einzelnen Zahlen und Buchstaben dieser Figur nun so ein, wie es die untere Figur angibt. Dies ist aber die Anordnung der Brücke, welche wir auf S. 72 beschrieben und begründet haben. Man schaltet nun beim Gebrauch des Instrumentes denjenigen von den Widerständen 1 bis 1000 ein, der dem zu bestimmenden Widerstand x am nächsten liegt (was man durch einen Vorversuch ermittelt), und verschiebt den Kontakt g so lange, bis der Zeiger auf Null bleibt. Dann steht der zu bestimmende Widerstand zu dem bekannten (durch die Stöpsel ausgeschalteten) in demselben Verhältnis wie die Längen der beiden Teile des Meßdrahtes, die man entweder direkt oder in Graden ausgedrückt auf der Skala der Schieferplatte abliest. Man hat daher den zu bestimmenden Widerstand sofort in Ohm ausgedrückt.

Fig. 81.

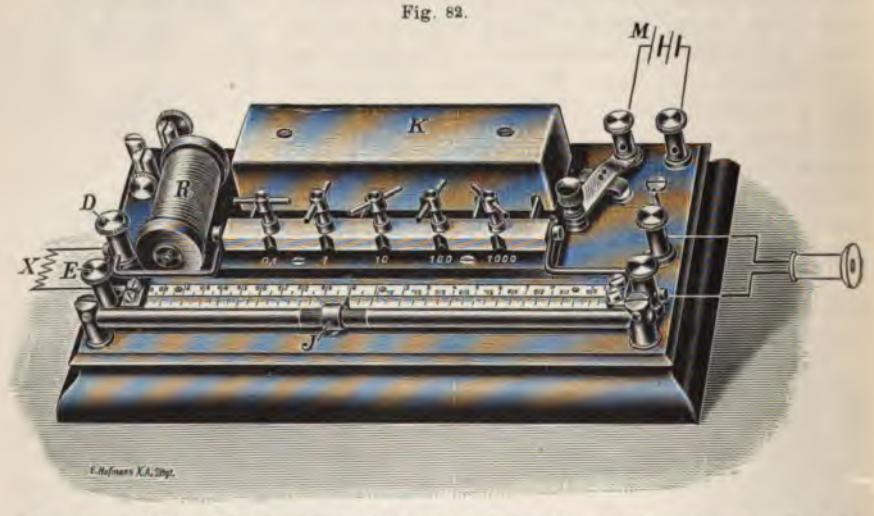


In Bezug auf die Schnelligkeit und Bequemlichkeit der Widerstandsbestimmung läßt das Universalgalvanoskop nichts zu wünschen übrig.

Auf diese Weise läßt sich der Widerstand jedes Leiters messen. Ohne weiteres anwendbar ist die Methode der Wheatstoneschen Brücke in der angegebenen Art bei metallischen Leitern und bei anderen Leitern erster Klasse. Bei der Bestimmung des Widerstandes von zusammengesetzten Flüssigkeiten kommt aber noch eine Komplikation hinzu, so daß bei ihnen die Methode noch etwas abgeändert werden muß. Eine Flüssigkeit nämlich wird, wie wir in Kap. 6 sehen werden, durch einen galvanischen Strom zersetzt und wirkt dann selbst wie ein galvanisches Element. Man kann das aber verhindern, indem man durch die Flüssigkeit rasch hintereinander Ströme von entgegengesetzter Richtung, sogenannte Wechselströme, sendet. Macht man dann die zu untersuchende Flüssigkeit zu der einen Seite eines Wheatstoneschen Vierecks, so kann man durch Abgleichen der Widerstände auch hierbei die Wechselströme in der Brücke verschwinden machen und dadurch den Widerstand der Flüssigkeit messen. Derartige Wechselströme liefert z. B. ein sogenannter Induktionsapparat, wie wir ihn in Kap. 9 beschreiben werden. Nur ist noch die Schwierigkeit vorhanden, daß ein Galvanoskop in der Brücke durch solche Wechselströme gar nicht

beeinflußt wird. Der erste Strom will z. B. die Nadel nach rechts ablenken, der zweite, gleich starke, aber entgegengesetzte Strom, sucht sie nach links abzulenken. Die Nadel bleibt daher, wie Buridans Esel, in Ruhe. Es gibt aber Apparate, die auch durch Wechselströme in gleicher Weise beeinflußt werden wie die Galvanoskope durch gleichgerichtete Ströme, nämlich die Elektrodynamometer, die wir in Kap. 8, und die Telephone, die wir in Kap. 9 beschreiben werden. Bringt man also z. B. ein Telephon in die Brücke und sendet man Wechselströme durch die ganze Kombination von Leitern, so wird man dieses so lange tönen hören, bis die Widerstände so abgeglichen sind, daß durch die Brücke keine Ströme gehen. Dann bleibt das Telephon ruhig, und dann bestimmt sich der Flüssigkeitswiderstand wie ein Drahtwiderstand. Diese Meßmethode ist von F. Kohlrausch ausgearbeitet worden. Man bedient sich vorteilhaft, um die Widerstände von Flüssigkeiten zu messen, einer Anordnung, wie sie von F. Kohlrausch angegeben und von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. unter dem Namen „Universalmeßbrücke“ ausgeführt wird. Dieselbe ist in Fig. 82 gezeichnet. Man

Fig. 82.



sieht eine kleine Drahtrolle R links in der Figur; diese ist der Induktionsapparat, der die Wechselströme erzeugt. Er erhält einen Strom von einem Element M, das rechts schematisch gezeichnet ist. In dem Kästchen K befinden sich fünf Widerstände von 0,1, 1, 10, 100, 1000 Ohm, welche durch Herausnehmen der vor dem Kästchen befindlichen Stöpsel eingeschaltet werden können. Auf der geteilten Skala liegt ein Platindraht, auf welchem ein Metallzeiger J verschoben werden kann, der sich auf einem Messingstab bewegt. Der zu messende Widerstand X wird an die Klemmen D und E links, das Telephon T rechts angelegt. Man verschiebt den Zeiger auf dem Meßdraht so lange, bis der Ton im Telephon verschwindet, und bestimmt dadurch auf bekannte Weise den Widerstand der Flüssigkeit ganz so, wie man es bei einem festen Leiter tut. In das Schema der Wheatstoneschen Brücke gebracht, reihen sich

die einzelnen Teile des Apparates so aneinander, wie es Fig. 83 zeigt. T ist das Telephon, R der Induktionsapparat.

Will man Flüssigkeiten auf ihre Leitungsfähigkeit untersuchen, so füllt man sie in Gefäße, etwa von der Form der in Fig. 84 gezeichneten. Durch die Ebonitdeckel dieser Gefäße gehen Messingstäbchen hindurch, welche unten Platinscheibchen tragen, durch welche der Strom in die Flüssigkeit geleitet wird. Diese Scheiben mit ihren Stielen nennt man die Elektroden. Oben befinden sich die Klemmschrauben zur Verbindung. Bequemer sind noch die Gefäße von der Form 85, einfache Fläschchen, in denen zwei halbzylindrische Elektroden aus Platin stehen, die mit Platindrähten versehen sind. Letztere gehen eingeschmolzen durch das Glas hindurch. Man füllt ein solches Gefäß zunächst mit einer der Lösungen, deren Leitfähigkeit auf S. 83 angegeben ist, und bestimmt den Widerstand derselben, dann füllt man es mit der zu untersuchenden Lösung und bestimmt wieder den Widerstand. Die Leitfähigkeit der zu untersuchenden Lösung verhält sich dann zu der der bekannten Lösung umgekehrt wie die Widerstände derselben.

Fig. 83.

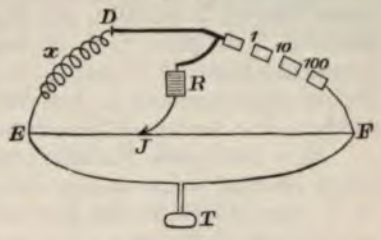


Fig. 84.

Ein spezieller Fall von flüssigen Widerständen ist der innere Widerstand der galvanischen Elemente selbst. Es ist eine häufig notwendige Aufgabe, diesen inneren Widerstand zu bestimmen. Am einfachsten und raschesten kann man ihn, ebenso wie den jeder Flüssigkeit, durch die Wheatstonesche Brücke mit Wechselströmen und Telephon bestimmen. Man braucht eben nur in Fig. 82 bei x das zu untersuchende Element einzuschalten.

Fig. 85.

Natürlich hängt der innere Widerstand eines galvanischen Elements von der Größe des Elements, von der Beschaffenheit der Tonzellen u. s. w. ab. Man kann deshalb für die gewöhnlich benutzten Elemente auch nur ungefähre Angaben über den inneren Widerstand machen. Ein Bunsensches Element von der Größe, wie sie gewöhnlich gebraucht wird (32 cm Höhe), hat nur etwa 0,2 Ohm Widerstand, ein gewöhnlicher Daniell etwa 0,6 Ohm, ein Meidinger-Element, je nach der Größe, 4 bis 10 Ohm, ein Element der deutschen Telegraphenverwaltung 7,5 Ohm, ein Leclanché-Element ungefähr 0,3 Ohm, das S. & H.-Beutelelement nur 0,06 Ohm, und ein Trockenelement von Hellesen etwa 0,1 Ohm Widerstand.

Aus diesen Angaben und aus den Werten der elektromotorischen

Kraft dieser Elemente, die früher angegeben wurden, kann man die Stromstärke bei der Kurzschließung der Elemente (S. 66) berechnen. Sie wäre für ein Bunsen-Element etwa $\frac{1{,}9}{0{,}2}\,\frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}} = 9{,}5$ Ampere, für einen Daniell 2 Ampere, ein Meidinger-Element 0,5 Ampere, Leclanché-Element 5 Ampere, S. & H.-Beutelelement über 20 Ampere, Hellesen-Trockenelement 15 Ampere. Doch werden alle Elemente durch so starke Ströme rasch ruiniert, so daß diese Zahlen nicht wirklich zu entnehmende, sondern nur maximale Stromstärken bedeuten.

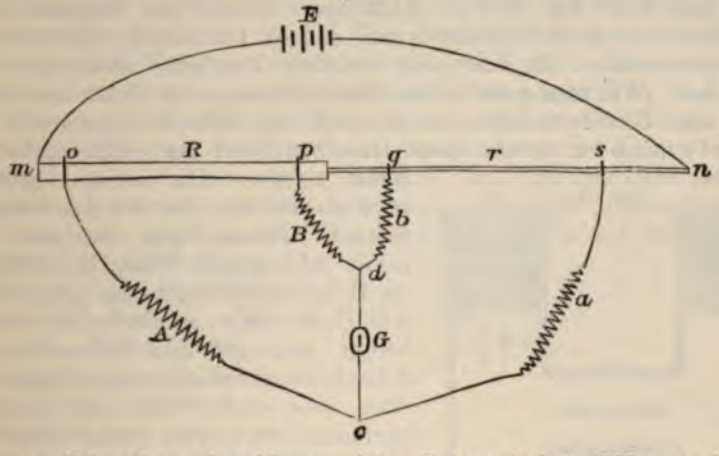
Eine besondere Modifikation erfordert die Methode der Wheatstoneschen Brücke, wenn es sich darum handelt, sehr kleine Widerstände (z. B. von 0,01 Ohm oder gar 0,00001 Ohm) zu messen. Da kann man die gewöhnliche Schaltung nicht anwenden, erstens weil genaue Vergleichswiderstände von diesem geringen Betrage schwer herzustellen und sehr kostspielig sind, hauptsächlich aber, weil die Verbindungen von Drähten untereinander durch Klemmschrauben selbst schon Widerstände von diesem Betrag besitzen können. Und solche Messungen sind allmählich immer wichtiger geworden, da man in elektrischen Anlagen es oft mit sehr kleinen Widerständen zu tun hat, in denen sehr große Stromstärken enthalten sind. Deswegen hat Sir W. Thomson (Lord Kelvin) eine eigene Methode dafür angegeben, welche nach ihm die Methode der Thomsonbrücke oder Doppelbrücke heißt. Das Prinzip derselben ist aus der schematischen Fig. 86 ersichtlich. Der zu messende Widerstand R und ein ausgespannter dicker Draht r, ein Meßdraht, werden hintereinander geschaltet. Von zwei festen Stellen des zu messenden Widerstandes R, nämlich von o und p, werden zwei gleiche Widerstände A und B (etwa je 10 Ohm) zu zwei Punkten c und d hingeführt, und ebenso werden von zwei Stellen des Meßdrahtes, nämlich q und s, durch verschiebbare Kontakte zwei einander gleiche Widerstände a und b, etwa je 1000 Ohm, zu denselben Punkten hingeführt. Zwischen c und d wird ein Galvanoskop G eingeschaltet, zwischen m und n eine (starke) Batterie E, etwa von 8 Volt Spannung. Das Galvanoskop zeigt natürlich einen Ausschlag. Man verschiebt nun den einen der Kontakte, etwa s, während man den anderen, q, fest liegen läßt, so lange, bis der Ausschlag des Galvanoskops verschwindet. Ist das erreicht, dann läßt sich zeigen, daß

$$\frac{\text{Widerstand von R}}{\text{Widerstand von r}} = \frac{\text{Widerstand von A}}{\text{Widerstand von a}}$$

ist. Der Widerstand von R ist dann also in unserem Beispiel nur ein Hundertstel des Widerstandes von r. Ist nun r ein ausgespannter dicker Draht, der in 1000 mm geteilt ist, und hat der ganze Draht, wie man es in der Praxis macht, den Widerstand von 0,01 Ohm, so hat also jeder Millimeter des Drahtes den Widerstand von $\frac{1}{100\,000}$ Ohm, und der gesuchte Widerstand von R ist dann gleich der Zahl der Millimeter zwischen q und s, dividiert durch 10 Millionen. Damit kann man also sehr kleine Widerstände messen.

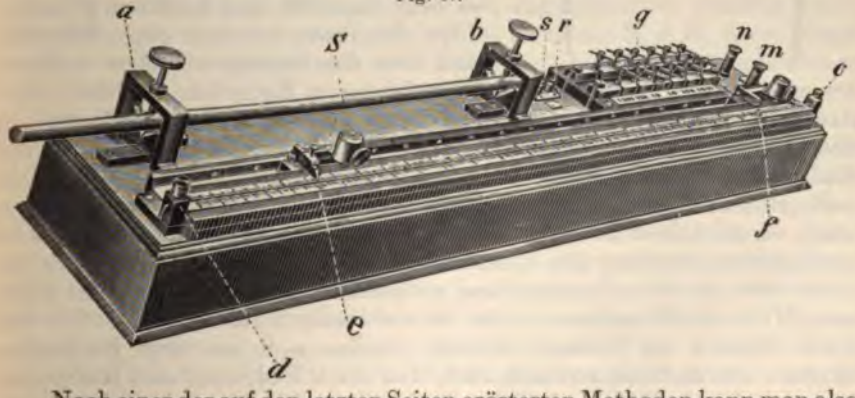
Bei der praktischen Anordnung dieser Messungen kann man sich der in Fig. 87 abgebildeten Thomsonbrücke von E d e l m a n n bedienen. Man sieht bei dieser den ausgespannten Draht c d von 0,01 Ohm Widerstand mit den beiden verschiebbaren Kontakten f und e, ferner sieht man als zu untersuchenden Widerstand eine dicke Kupferstange S, die bei a und b

Fig. 86.



mit festen Schrauben eingeklemmt ist. Bei g sind 4 Widerstandssätze von je 10, 100 und 1000 Ohm angebracht, aus denen man die Widerstände A, B und a, b der vorigen Figur bildet. Nimmt man für a, b die Widerstände von je 1000 Ohm und für A, B entweder je 10 oder 100 oder 1000 Ohm, so hat man ein Verhältnis von 0,01 oder 0,1 oder 1. Zwischen m und n wird die Batterie, zwischen s und r das Galvanometer eingeschaltet.

Fig. 87.

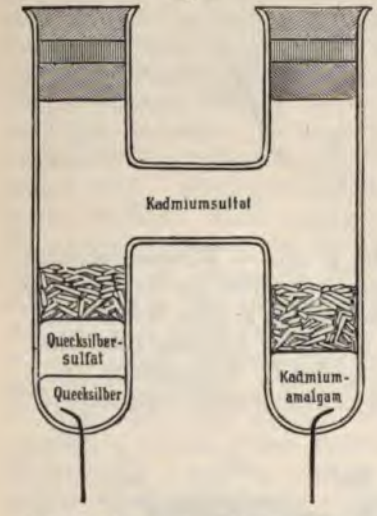


Nach einer der auf den letzten Seiten erörterten Methoden kann man also von jedem Draht, von jeder Flüssigkeitssäule den Widerstand in Ohm messen.

Die zweite Größe, welche bei jedem Strom in Betracht kommt, ist die elektromotorische Kraft. Als Einheit für dieselbe haben wir 1 Volt genommen. Praktisch vergleicht man häufig die elektromotorische Kraft eines beliebigen Elementes mit der eines Daniell

und bezieht also auf einen Daniell die Kräfte aller anderen Elemente. Da 1 Volt nur etwa 10 Proz. kleiner ist als 1 Daniell, so ist damit auch die elektromotorische Kraft gleich ungefähr in Volt bestimmt. Die elektromotorische Kraft eines Bunsenschen Elementes ist ungefähr 1,9 Volt, die eines Leclanché-Elementes gleich 1,5 Volt. Eine Kette von zehn hintereinander verbundenen Bunsenschen Elementen hat also eine elektromotorische Kraft von 19 Volt. Daß man 1 Daniell zum Vergleich nimmt, ist nur willkürlich und beruht darauf, daß ein Daniellsches Element leicht zusammenzusetzen ist und eine ziemlich konstante elektromotorische Kraft hat. Will man ganz genaue Bestimmungen der elektromotorischen Kraft eines Elementes haben, so benutzt man vielmehr sogenannte Normalelemente, welche stets denselben Wert der elektromotorischen Kraft haben. Am meisten gebraucht wird als solches das Kadmiumelement. Dieses kann man sich leicht selbst in folgender Weise herstellen. In ein H-förmiges Reagenzglas (Fig. 88) (von Alb. Geißler Ww. in Berlin zu beziehen) bringt man auf den Boden des einen Schenkels eine Schicht reinen Quecksilbers, über diese einen Teig, der durch Zusammenreiben von schwefelsaurem Quecksilberoxydul mit Kristallen von schwefelsaurem Kadmium und Quecksilber gebildet ist. In den anderen Schenkel wird Kadmiumamalgam gefüllt, welches aus 90 Teilen Quecksilber und 10 Teilen Kadmium besteht. Da das Amalgam bei gewöhnlicher Temperatur fest ist, wird es heiß eingefüllt und erstarren gelassen. Über die Paste in dem einen Schenkel und über das Amalgam in dem anderen Schenkel werden Kristalle von schwefelsaurem Kadmium geschüttet und das Ganze in beiden Schenkeln mit konzentrierter Kadmiumsulfatlösung übergossen. Die Gläser werden in der Weise verschlossen, daß auf die Kadmiumsulfatlösung heißes Paraffin gegossen wird, darauf ein Kork in jeden Schenkel eingesetzt und die Mündung mit Marineleim ausgegossen wird. In die Gläser ist unten je ein Platindraht eingeschmolzen, welche zur Zuleitung dienen. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes ist 1,019 Volt bei allen Temperaturen zwischen 10 und 20°. Statt des Kadmium-(Weston-)Elementes wurde bis vor wenigen Jahren gewöhnlich das Clark-Element als Normale benutzt, welches sich von dem Kadmiumelement nur dadurch unterscheidet, daß statt Kadmium und Kadmiumsulfat vielmehr Zink und Zinksulfat angewendet ist. Seine elektromotorische Kraft ist aber ziemlich erheblich von der Temperatur abhängig, sie beträgt bei 15° 1,438 Volt, bei 20° 1,433 Volt. Gerade deswegen wird jetzt das Kadmiumelement dem Clark-Element vorgezogen, aus demselben Grunde, wie für Normalwiderstände Manganindrähte viel geeigneter sind als Kupferdrähte.

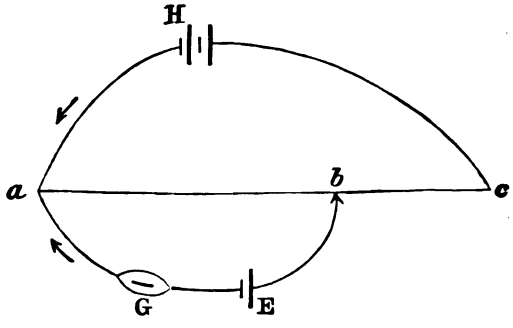
Fig. 88.



Um nun die elektromotorische Kraft irgend eines Elementes mit der eines Daniell- oder eines Kadmium- oder Clark-Elementes zu vergleichen, hat man verschiedene Methoden. Da die elektromotorische Kraft eines Elementes gleich der Spannungsdifferenz seiner Pole im ungeschlossenen Zustand (also ohne Strom) ist, so kann man sie dadurch bestimmen, daß man an dem Quadrantelektrometer erst den Ausschlag, den ein Kadmiumelement gibt, dann den Ausschlag des zu bestimmenden Elementes mißt. Das Verhältnis dieser Ausschläge ist gleich dem Verhältnis der elektromotorischen Kräfte. Man kann so die gesuchte elektromotorische Kraft sofort in Volt ausdrücken, da man die elektromotorische Kraft eines Kadmiumelementes in Volt kennt.

Gewöhnlich aber bestimmt man elektromotorische Kräfte von Elementen im geschlossenen Zustand, und von den dazu benutzten Methoden ist die wichtigste und immer anwendbare die sogenannte Kompensationsmethode. Diese Methode beruht auf der Stromverzweigung, die auf S. 73 besprochen ist. In dieser läßt sich nämlich bewirken, daß in dem einen Zweige, in dem gerade das zu untersuchende Element sich befindet, kein Strom fließt, und wenn das stattfindet, so verhalten sich die elektromotorischen Kräfte wie bekannte Widerstände. Man verbindet hierbei (Fig. 89) zunächst eine konstante starke Hilfssäule H (z. B. zwei Bunsen-Elemente) mit den Endpunkten a und c eines ausgespannten, ziemlich dünnen Drahtes, und eines der zu vergleichenden Elemente E, z. B. einen Daniell, einerseits mit a, andererseits mit einem auf dem Draht verschiebbaren Kontakt b, und zwar so, daß die gleichnamigen Pole von E und H nach a hinzeigen (in beiden z. B. der Zinkpol). In den Zweig von E schaltet man noch ein Galvanoskop G ein und verschiebt den Gleitkontakt b so lange, bis durch das Galvanoskop kein Strom mehr geht. Da der Zweig a G E dann stromlos ist, so muß der Spannungsunterschied zwischen a und b gerade gleich der elektromotorischen Kraft von E sein. Schaltet man nun statt E das zweite zu untersuchende Element E′ (z. B. ein Leclanché) ein und macht das Galvanoskop wieder stromlos, so kommt der Gleitkontakt auf eine andere Stelle b′. Es muß dann der Spannungsunterschied zwischen a und b′ der jetzigen elektromotorischen Kraft gleich sein. Diese Spannungsdifferenzen verhalten sich aber wie die Längen der Drahtstücke a b und a b′, und in demselben Verhältnis stehen daher auch die gesuchten elektromotorischen Kräfte, z. B. eines Daniell und eines Leclanché. So kann man die elektromotorische Kraft eines Leclanché in Daniell und dadurch auch in Volt ausdrücken.

Fig. 89.



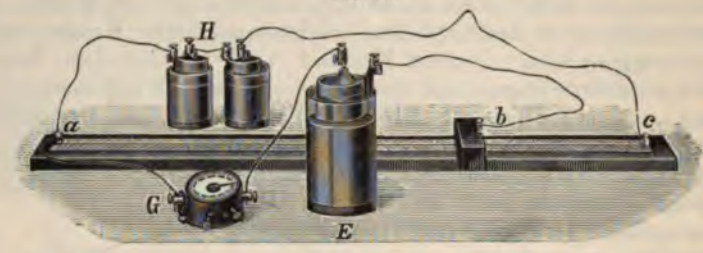
Zur Ausführung dieser Messungen verbindet man die Apparate wie

in Fig. 90 und schaltet an Stelle von E erst das eine, dann das andere der zu vergleichenden Elemente ein.

Die Kompensationsmethode hat den Vorzug, daß bei ihr das zu untersuchende Element während der Messung stromlos ist. Sie läßt sich also insbesondere auch bei den sogenannten inkonstanten Elementen anwenden, d. h. bei denjenigen, deren elektromotorische Kraft sich ändert, wenn ein Strom durch sie hindurchfließt.

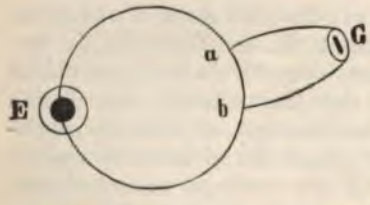
Praktisch von weit größerer Bedeutung als die Messung der elektromotorischen Kraft von Elementen ist die Messung des Spannungsunterschiedes an zwei Punkten eines geschlossenen Stromkreises und speziell die Messung der Klemmenspannung, d. h. des Spannungsunterschiedes an den Polen einer Batterie, während der Stromkreis geschlossen ist. Wir wissen schon (S. 68), daß die Klemmenspannung einer Batterie nicht, wie die elektromotorische Kraft, immer dieselbe Größe hat, sondern daß sie verschieden ist, je nach der Stärke des Stromes, den die Batterie liefert, also je nach der Größe des äußeren Widerstandes, durch den die Batterie geschlossen ist.

Fig. 90.



Man kann nun aber Spannungsunterschiede leicht und direkt in Volt messen, wenn man nur ein Galvanometer hat, dessen Skala in Ampere oder Milliampere geteilt ist, so daß man also weiß, wie vielen Ampere jeder Grad Ausschlag des Zeigers im Instrument entspricht. Das einfache Mittel zur Messung von Spannungsunterschieden und Klemmenspannungen besteht darin, daß man das Galvanometer nicht direkt in den Stromkreis einschaltet, sondern parallel zu ihm. Es sei z. B. in Fig. 91 E a b ein Stromkreis, in dem ein Strom vom Element E aus fließt, und man wolle den Spannungsunterschied an irgend zwei Punkten a und b des Stromkreises bestimmen. Man verbindet dann, parallel zu dem Drahtstück a b, das Galvanometer G mit den beiden Punkten a und b. Man sagt dann, das Galvanometer liegt im Nebenschluß zu a b. Wir wissen nun (S. 69), daß der Strom im Galvanometer G gleich dem Spannungsunterschied von a und b dividiert durch den Widerstand der Zweigleitung ist. Der Widerstand der Zweigleitung ist aber, bis auf die notwendigen Verbindungsdrähte, einfach der des Galvanometers.

Fig. 91.



Legt man also das Galvanometer an andere und andere Punkte a und b an, so geben, da ja der Widerstand des Galvanometers derselbe bleibt, die Ausschläge direkt ein Maß für die Spannungsdifferenz an den Punkten a und b. Kennt man nun die Ausschläge, welche das Galvanometer für 1, 2, 3 etc. Ampere gibt, und kennt man den Widerstand des Galvanometers in Ohm, so kann man bei jedem Ausschlag angeben, wie groß der Spannungsunterschied in Volt ist, durch die er hervorgerufen ist. Denn man erhält diesen Spannungsunterschied in Volt, wenn man den Widerstand des Galvanometers in Ohm mit der Stromstärke in Ampere multipliziert, da ja die Beziehung besteht:

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm}.$$

Natürlich wird im allgemeinen durch die Anlegung eines solchen Amperemeters im Nebenschluß zu a b die Stromstärke und die Spannungsverteilung etwas geändert. Je größer der Widerstand des Galvanometers ist, desto geringer ist aber der abgezweigte Strom, der durch dasselbe hindurchfließt, desto geringer ist also die Störung. Man nimmt deswegen für solche Galvanometer, die im Nebenschluß gebraucht werden, um Spannungsunterschiede zu messen, am besten solche von großem Widerstand, etwa 100 Ohm; oft aber genügt auch ein Widerstand von 10 oder von 1 Ohm. So hat z. B. das Milliamperemeter, das oben S. 77 abgebildet ist, einen Widerstand von 1 Ohm. Da jeder Grad der Teilung desselben einer Stromstärke von 0,001 Ampere (1 Milliampere) entspricht, so gibt das Instrument, wenn es im Nebenschluß an zwei Punkte des Stromkreises angelegt wird, pro Teilstrich einen Spannungsunterschied von

$$0{,}001 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm} = 0{,}001 \text{ Volt},$$

also einem Millivolt an. Wenn solche Galvanometer nur zur Messung von Spannungen benutzt werden sollen, so teilt man ihre Skala gleich in Volt ein und bezeichnet die Instrumente dann als Voltmeter.

Da der Zeiger im ganzen nur 150 Teilstriche Ausschlag machen kann, so kann das Instrument so offenbar nur Spannungen zwischen 0,001 und 0,15 Volt messen, größere nicht.

Um nun aber auch größere Spannungen messen zu können, hat man ein einfaches Mittel. Man braucht nämlich bloß in die Zweigleitung noch außer dem Galvanometer einen bekannten Widerstand einzuschalten. Je größer der gesamte Widerstand der Zweigleitung ist, desto geringer ist der Zeigerausschlag für 1 Volt, desto größere Spannungen kann man also noch messen. Deswegen werden solchen Milliamperemetern, wenn man sie zur Messung der Spannungen, also als Voltmeter benutzen will, Widerstandskasten (Fig. 92) beigegeben, mit abgemessenen Widerständen von 9, 99, 999 und 9999 Ohm, die man auch in die Zweigleitung einschaltet. Da der erste dieser Widerstände 9 Ohm hat, so ist der ganze Widerstand der Zweigleitung dann 10 Ohm und es entspricht daher ein Grad Ablenkung des Zeigers einem Spannungsunterschied von

$$10 \text{ Ohm} \times 0{,}001 \text{ Ampere} = 0{,}01 \text{ Volt}.$$

Dadurch kann man also schon Spannungen von 0,01 bis 1,5 Volt messen.

Schaltet man den zweiten Widerstand, der 99 Ohm groß ist, zum

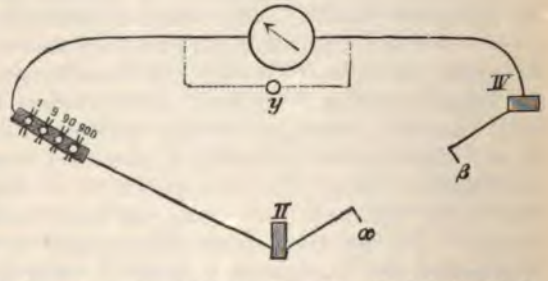
Galvanometer ein, so enthält die Zweigleitung 100 Ohm Widerstand, es entspricht also jeder Grad 100 Ohm $\times$ 0,001 Ampere = 0,1 Volt, so daß man Spannungen von 0,1 bis 15 Volt damit messen kann. Ebenso entspricht bei dem dritten Widerstand (von 999 Ohm) jeder Grad 1 Volt und bei dem vierten Widerstand (von 9999 Ohm) jeder Grad 10 Volt. Dadurch kann man dann also Spannungsdifferenzen von 0,001 bis 1500 Volt messen.

Fig. 92.

Hat ein solches Instrument, das Milliampere zeigt, nicht 1 Ohm, sondern 100 Ohm Widerstand, so enthält der beigegebene Widerstandskasten, um die Messung größerer Spannungen zu ermöglichen, Widerstände von 900, 9900, 99 900 Ohm, so daß die Zweigleitung in den einzelnen Fällen 100, 1000, 10 000, 100 000 Ohm enthält.

Das Universalgalvanometer von Siemens & Halske, das oben (S. 91 f.) schon zu Widerstandsmessungen sich als sehr praktisch erwies, läßt sich auch für solche Spannungsmessungen bequem verwenden. Zu dem Zweck ist dem Instrument ein Metallbügel beigegeben, welcher an die Klemmen II und IV angeschraubt wird. Die übrigen Klemmen, sowie der kreisförmig ausgespannte Draht kommen bei diesen Messungen nicht in Betracht, wohl aber die Widerstände 900, 90 und 9 Ohm, welche zur Erzielung der passenden Empfindlichkeit dienen. Diejenigen beiden Punkte eines Stromkreises α und β, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll, werden an die Klemmen II und IV geschaltet. Das auf dem Grundriß (Fig. 80) sichtbare Loch y wird gestöpselt, wodurch die Angaben des Instruments erst wirklich Milliampere werden (für die Widerstandsmessung oben kam es ja darauf nicht an, da das Galvanometer keinen Ausschlag angeben sollte). Es ordnen sich nun die einzelnen Teile des Instrumentes so, wie es Fig. 93 zeigt. Sind die Widerstände 900, 90 und 9 eingeschaltet, so ist im Galvanometerzweig der Widerstand 1000 Ohm enthalten, da das Galvanometer selbst 1 Ohm Widerstand besitzt. Folglich entspricht jeder Grad Ausschlag der Spannung 1 Volt. Sind bloß 90 und 9 eingeschaltet, so entspricht jeder Grad 0,1 Volt, bei 9 allein 0,01 Volt, und wenn alle Widerstände gestöpselt sind, so entspricht jeder Grad 0,001 Volt.

Fig. 93.

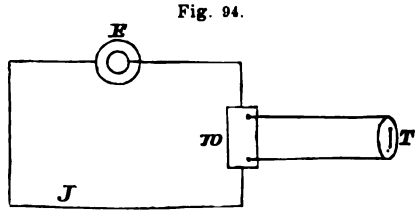


Wenn man so die Klemmenspannung eines jeden Elementes in Volt ausdrücken kann und wenn man den Widerstand des Schließungsdrahtes nach früheren Methoden in Ohm bestimmt hat, so kennt man sofort die Stromstärke in Ampere, welche in diesem Draht herrscht. Denn es ist die

$$\text{Anzahl der Ampere} = \frac{\text{Anzahl der Volt}}{\text{Anzahl der Ohm}}.$$

Indes bestimmt man gewöhnlich die Stromstärke ganz direkt in Ampere, indem man in den Stromkreis selbst ein Galvanometer, speziell ein Amperemeter einschaltet. Die Milliamperemeter, die wir bisher angeführt haben, gestatten allerdings direkt nur geringe Stromstärken zu messen, nämlich solche zwischen 0 und 150 Milliampere. Für noch geringere Stromstärken werden die ganz feinen Galvanometer benutzt, die wir erst im Kap. 7 besprechen werden. Man kann aber mit den Milliamperemetern und überhaupt mit jedem für ganz schwache Ströme eingerichteten Instrument auch leicht Ströme von sehr großer Stärke messen, indem man sich eines einfachen und zweckmäßigen Kunstgriffes bedient. Es werden nämlich diesen Amperemetern genau abgemessene, sehr kleine Widerstände beigegeben, welche in den zu messenden Stromkreis mit eingeschaltet werden (und, da sie eben sehr klein sind, die Stromstärke desselben nur unwesentlich ändern). An die Enden dieser Widerstände, die gewöhnlich $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{999}$ u. s. w. Ohm betragen, wird nun, und das ist der Kunstgriff, das Milliamperemeter in den Nebenschluß gelegt. Die Schaltung zur Messung der Stromstärke ist also die durch Fig. 94 dargestellte. Von der Batterie E fließt der Strom J, dessen Stärke gemessen werden soll. In diesen ist der kleine Widerstand w (etwa von $^1/_{999}$ Ohm) eingefügt und parallel zu diesem ist das Milliamperemeter T eingeschaltet. Wird nun in diesem Instrument die Nadel um 1 Grad abgelenkt, so wird dasselbe, wie wir wissen, und wie sein Name sagt, von einem Strom von 0,001 Ampere durchflossen. In dem Widerstand von $^1/_{999}$ Ohm fließt dann, nach dem Gesetz der Stromverzweigung von S. 69, ein 999mal so starker Strom, also ein Strom von 0,999 Ampere, da das Galvanometer den Widerstand 1 Ohm hat. Und in dem Hauptstrom, dessen Stärke gemessen werden soll, fließt danach ein Strom von

Fig. 94.



$$0{,}999 + 0{,}001 = 1 \text{ Ampere}.$$

Jeder Grad im Milliamperemeter entspricht danach einer Stromstärke von 1 Ampere im Hauptstrom. Hat der eingeschaltete Widerstand nicht $^1/_{999}$, sondern $^1/_9$ oder $^1/_{99}$ oder $^1/_{9999}$ Ohm Widerstand, so gibt jeder Grad im Milliamperemeter eine Stromstärke von 0,01 oder von 0,1 oder von 10 Ampere im Hauptstrom an. So kann man also Stromstärken von 0,001 bis 1500 Ampere mit dem Instrument messen. Die sehr kleinen Widerstände von $^1/_9$ bis $^1/_{9999}$ Ohm werden aus dicken Manganinstreifen gebildet, deren Widerstand sich ja auch bei der Erwärmung nicht ändert (S. 83). Die Widerstände sind in Kästchen mit durchbrochenen Wänden enthalten, wie aus Fig. 95 zu ersehen ist.

Bei dem Universalgalvanometer ist dabei die Schaltung genau dieselbe wie bei der Spannungsmessung. An die Klemmen II und IV wird der beigegebene Bügel angelegt, an diesen der kleine Widerstand

von Fig. 95 angeschaltet und es wird der zu messende Strom mit durch diesen Widerstand geschickt, während alle Widerstände des Instruments sonst durch die Stöpsel ausgeschaltet sind.

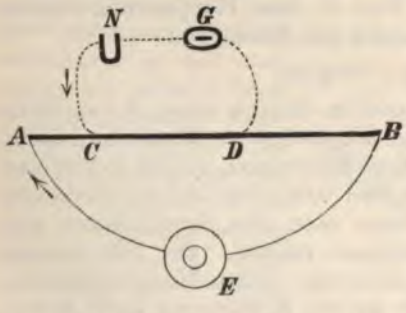
Fig. 95.

Sehr zweckmäßig werden neuere Präzisionsmeßinstrumente von Siemens & Halske, wie Fig. 96 zeigt, gleich derart eingerichtet, daß man in ihnen sowohl für die Voltmessung wie für die Amperemessung verschiedene Meßbereiche hat, indem die dazu notwendigen Vorschalt- und Nebenschlußwiderstände gleich in dem Boden des Apparates angebracht sind und durch Herausnehmen des Stöpsels eingeschaltet werden können. So hat das gezeichnete Instrument je nach der Stellung des Stöpsels links für die Spannungsmessung die drei Meßbereiche von 0 bis 3 oder bis 15 oder bis 150 Volt, und beim Einschalten des Stöpsels rechts für die Stromstärken die Meßbereiche von 0 bis 0,15 oder bis 1,5 oder bis 15 Ampere.

Fig. 96.

Da die Normalelemente, insbesondere das Kadmiumelement, eine sehr genau bestimmte und konstante elektromotorische Kraft haben, und da sie leicht und bequem herzustellen und aufzuheben sind, so braucht man sie seit einigen Jahren direkt, um mit ihrer Hilfe Spannungsdifferenzen und Stromstärken zu bestimmen. Man bedient sich zu diesem Zweck der Kompensationsschaltung, die schon auf S. 99 eingeführt wurde, die wir aber hier genauer besprechen wollen. Wenn wir einen Stromkreis (Fig. 97) bilden aus einer beliebigen Batterie E, beliebigen Drähten E A und E B und einem ausgespannten Draht A B, dessen Widerstand für jeden Zentimeter in Ohm wir kennen, so können wir mit Hilfe eines Normalelementes N und eines Galvanoskops sofort die Stromstärke in dem Kreise E A B in Ampere ermitteln, wenn wir die in der Figur angegebene Schaltung anwenden. Wir legen nämlich das Normalelement einerseits an einen Punkt C an, so daß die Stromrichtung die in der Figur gezeichnete ist, und verbinden andererseits N durch ein Galvanoskop hindurch mit einem Schleifkontakt D auf dem Draht. Verschieben wir den Schleifkontakt so lange, bis das Galvanoskop stromlos ist, so ist die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten C und D auf dem Draht gerade gleich der elektromo-

Fig. 97.

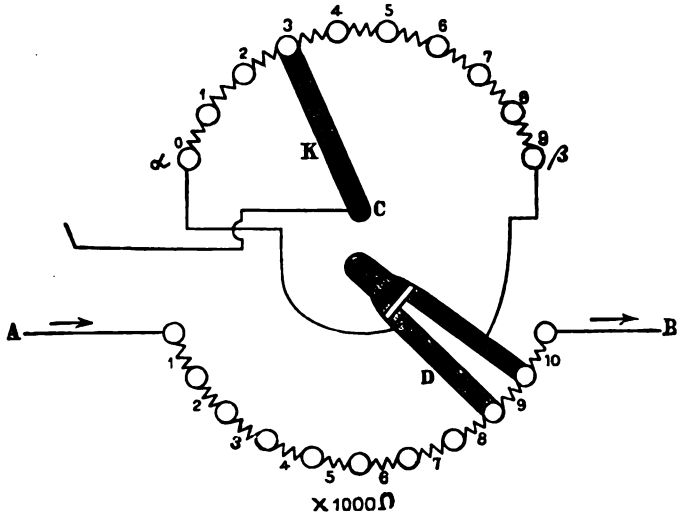


torischen Kraft des Normalelementes (also z. B. bei dem Kadmiumelement gleich 1,019 Volt). Der Widerstand von C D aber sollte, wie angenommen, in Ohm bekannt sein. Daher ergibt sich, daß die

$$\text{gesuchte Stromstärke in } CD = \frac{1{,}019}{\text{Widerstand von } CD} \text{ Ampere}$$

ist. Man kann so ohne ein geeichtes Galvanometer die Stromstärke in Ampere, und zwar sehr genau finden. Dieselbe Stromstärke, welche in dem Stück C D herrscht, herrscht in dem ganzen Stromkreis E A C D B, weil ja der Nebenschluß C N G D stromlos gemacht wurde. Den Stromkreis C N G D C bezeichnet man als die Kompensationsleitung.

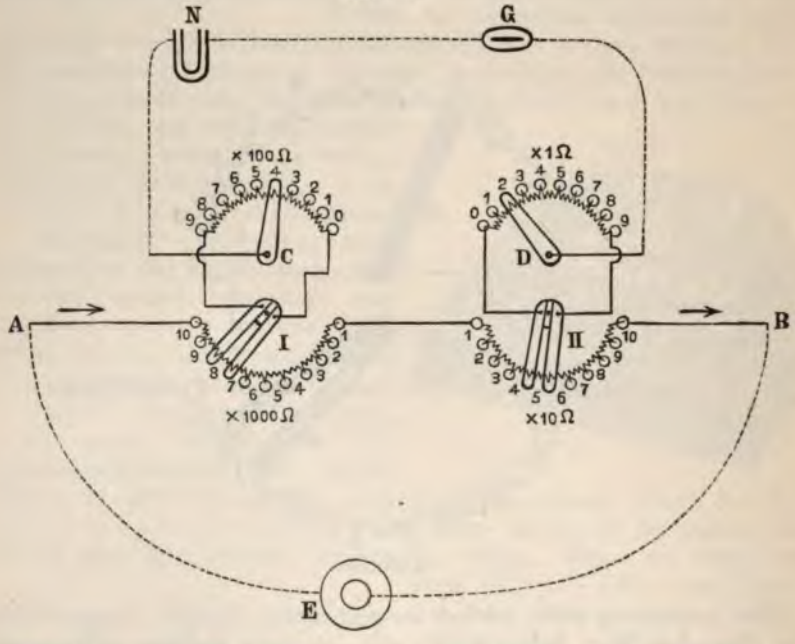
Fig. 98.



Die Anwendung eines solchen ausgespannten Drahtes, dessen Widerstand für jedes Stück bekannt sein soll, ist nicht bequem, insbesondere dann nicht, wenn man sehr große oder sehr kleine Widerstände C D in die Kompensationsleitung einführen muß. Man nimmt dann viel bequemer an Stelle des ausgespannten Drahtes einen Widerstandskasten, bei dem man bequem alle Widerstände von 0,1 Ohm bis zu 10 000 Ohm durch Stöpseln oder Kurbeln erhalten kann. Aber offenbar muß hier ein solcher Widerstandskasten eine besondere Einrichtung haben. Durch den Gleitkontakt D in Fig. 97 wird ja, wo er sich auch auf dem Draht A B befindet, der gesamte Widerstand dieses Drahtes und damit des ganzen Stromkreises E A B nicht geändert. Tritt D näher an C, so ist der Widerstand C D kleiner, dafür aber der Widerstand A C + D B größer, so daß A B immer denselben Widerstand behält. Würde man aber zwischen C und D einen Widerstandskasten einschalten und von diesem die zur Kompensation von N passenden Widerstände herausnehmen, so würde der gesamte Widerstand von A B sich ändern. Man muß deshalb vielmehr die Widerstandskasten, die man zwischen A und B einschaltet, so einrichten, daß derselbe Wider-

stand, den man aus ihnen zwischen C und D einschaltet, zugleich selbsttätig zwischen D und B oder A und C ausgeschaltet wird und umgekehrt, so daß der gesamte Widerstand zwischen A und B trotz der variablen Stöpselung immer derselbe bleibt. Solche Anordnungen sind in verschiedener Weise ausführbar. Apparate mit solcher Anordnung der Widerstände und zu diesem Zweck bezeichnet man als Kompensationsapparate. Es soll hier nur die Anordnung bei dem Apparat von Siemens & Halske beschrieben werden. Dabei sind die Widerstandskasten als Kurbelrheostaten (S. 88) ausgebildet und, um nicht zu viel

Fig. 99.



einzelne Rheostaten anbringen zu müssen, ist eine Anordnung der Widerstände getroffen, die zuerst aus Fig. 98 zu ersehen ist. In dieser sind zwischen A und B unten 10mal je 1000 Ohm zwischen den Kontaktknöpfen eingeschaltet. Aber ein aus zwei isolierten Teilen bestehender Hebel D ruht immer auf zwei von diesen Knöpfen und seine beiden Hälften sind mit den Enden α und β des oberen Rheostaten verbunden, der 9 Widerstände von je 1000 Ohm enthält. Dadurch sind zwischen A und B, wo auch die Kurbel D steht, immer 9900 Ohm enthalten. Denn die Kurbel schaltet stets einen der unteren Widerstände von 1000 Ohm mit dem oberen von 9000 Ohm parallel. Zwei solche parallel geschaltete Widerstände entsprechen aber 900 Ohm. Diese und die übrigen 9000 Ohm des unteren Rheostaten sind also dauernd zwischen A und B eingeschaltet.

Diese Anordnung ist nun in dem Kompensationskasten getroffen, von dem Fig. 99 das Schema gibt. Ein (zu messender) Strom fließt von der Batterie E durch die beiden Doppelkurbelrheostaten I und II, von

denen der erstere zwischen zwei Knöpfen je 1000 Ohm, der zweite je 10 Ohm enthält. Der Gesamtwiderstand des ersteren beträgt also 9900 Ohm, der des zweiten 99 Ohm, der ganze Widerstand zwischen A und B, der also bei allen Lagen der Kurbeln gleich bleibt, ist danach 9999 Ohm. Das Normalelement N ist nun einerseits mit der einfachen Kurbel am Punkte C, andererseits durch das Galvanometer G mit der einfachen Kurbel am Punkte D verbunden. Jedesmal, wenn die erste der beiden Kurbeln um einen Knopf weitergedreht wird, wird vermöge der Parallelschaltung ein Widerstand von 100 Ohm zugeschaltet, entsprechend wird bei der zweiten Kurbel jedesmal 1 Ohm zugeschaltet. Man stellt nun zunächst die Doppelkurbel I, dann die einfache Kurbel C, dann die Doppelkurbel II, endlich die einfache Kurbel D in solche Lage, daß das Galvanometer stromlos wird. Dann ist in die Kompensationsleitung bei der in der Figur gezeichneten Stellung ein Widerstand von 7442 Ohm eingeschaltet. Ist das Normalelement ein Kadmiumelement, so herrscht also an den Enden dieses Widerstandes eine Spannung von 1,019 Volt und folglich ist die Größe des durch A B fließenden Stromes, die gemessen werden sollte, gleich $\frac{1{,}019}{7442} = 0{,}000137$ Ampere. Man findet sofort auch die elektromotorische Kraft des Elementes E. Denn da dieses einen Strom von 0,000137 Ampere in einem Widerstand von 9999 Ohm (der Widerstand der Verbindungsdrähte ist vernachlässigt) erzeugt, so besitzt es eine elektromotorische Kraft von $0{,}000137 \times 9999 = 1{,}37$ Volt. Der Kompensationsapparat läßt sich in entsprechender Weise nicht bloß zu Messungen der Stromstärke, sondern auch zu Messungen der Spannung und des Widerstandes benutzen und erlaubt auch insbesondere einen Strom auf genau bemessene Stärke zu bringen. Da er dies alles nur durch Kombination von Widerständen zu erreichen gestattet, so ist er einer der brauchbarsten und vielseitigsten Apparate der gesamten elektrischen Meßtechnik.

Nachdem wir nunmehr das Hauptgesetz des elektrischen Stromes, das Ohmsche Gesetz, kennen, das bei j e d e m elektrischen Strom, mag er herkommen, wo er wolle, gilt, und die auf ihm beruhenden Messungen der Widerstände, elektromotorischen Kräfte, Spannungen und Stromstärken behandelt haben, wollen wir nun die Wirkungen des elektrischen Stromes der Reihe nach besprechen. Ein elektrischer Strom übt sowohl innerhalb seiner Bahn Wirkungen aus, als auch in der Umgebung seiner Bahn. Fast eine jede Wirkung, die der elektrische Strom erzeugt, ist, wie wir sehen werden, im stande, auch selbst wieder einen elektrischen Strom zu erzeugen, wenn man die Einrichtungen dazu zweckmäßig trifft.

5. Kapitel.

Die Wärme- und Lichtwirkungen des elektrischen Stromes. Thermoelektrizität.

Ein elektrischer Strom fließt dauernd nur durch eine ganz geschlossene Kette von Leitern. Auf seinem ganzen Wege müssen sich leitende Körper, Metalle, Kohle, Flüssigkeiten aneinander schließen, um dem Strom den Durchgang zu gestatten. Sowie an einer Stelle die Leitung unterbrochen ist, hört der Strom zu fließen auf. Es befindet sich dann zwar an den beiden getrennten Enden der Leitung freie Elektrizität, aber diese kann durch die trennende Schicht, bestehe sie nun aus Luft oder Glas oder Ebonit oder aus einem anderen Isolator, im allgemeinen nicht hindurchfließen.

In den elektrischen Leitern selbst aber bringt der Strom während seines Durchflusses Wirkungen hervor, die ganz verschiedener Art sind, je nach der Natur der Leiter, die vom Strome durchflossen werden.

Wir wollen zuerst den Strom vom galvanischen Element aus nur durch Leiter erster Klasse, also durch Metalle oder durch Kohle senden, also nicht durch Flüssigkeiten, außer durch das metallische Quecksilber.

Die hauptsächlichste Wirkung des elektrischen Stromes besteht nun darin, daß er einen jeden solchen Leiter, ein jedes Metall, ein jedes Stück Kohle, durch welches er fließt, erwärmt. Man kann sich davon leicht durch einen Versuch überzeugen, indem man, wie in Fig. 100, einen dünnen Draht, am besten aus Platin, spiralförmig aufwindet und in ein Gefäß J mit Weingeist taucht, in welchem sich ein Thermometer T befindet. Sowie man die Enden des Platindrahtes mit den Polen einer galvanischen Säule G verbindet, fließt der Strom durch den Platindraht (durch den Alkohol nicht, weil Alkohol ein Isolator ist) und der Draht wird dadurch erwärmt. Diese Wärme teilt sich dem Alkohol mit, dessen Temperatur steigt, und die Erhöhung der Temperatur zeigt sich an dem Thermometer an.

Wir müssen nun die Gesetze dieser Wärmeerzeugung ermitteln. Zunächst sieht man, daß die Temperatur am Thermometer um so höher wird, je länger der Strom durch den Draht fließt. Also finden wir das erste Gesetz, daß die durch den Strom entwickelte Wärmemenge um so größer wird, je längere Zeit der Strom fließt. In 2, 3, 4 Sekunden entwickelt der Strom 2-, 3-, 4mal so viel Wärme als in einer Sekunde.

Diese Wärme wird in jedem einzelnen Teile des Drahtes durch den Strom erzeugt, und daher ist die zweite Frage die: Wie hängt die Erwärmung eines Drahtstückes mit dem Widerstand

desselben zusammen? Der Versuch hat nun gelehrt, daß von einem und demselben Strome in einem Drahtstück um so mehr Wärme erzeugt wird, je größer der Widerstand dieses Drahtstückes ist. Schließen wir z. B. eine galvanische Säule durch einen Schließungskreis, in welchem sich zwei solche Drahtspiralen je in einem Gefäß mit Alkohol und Thermometer befinden, nehmen wir aber die beiden Spiralen so, daß sie ungleichen Widerstand haben, daß die erste z. B. einen 3mal so großen Widerstand hat als die zweite, so zeigen uns die Angaben der Thermometer, daß in der ersten Spirale auch 3mal so viel Wärme entwickelt wurde wie in der zweiten. Die Stärke des Stromes ist im ganzen Stromkreis, also auch in den beiden Spiralen dieselbe; die Erwärmung der einzelnen Leiterstücke hängt also ab von ihrem Widerstand und ist um so größer, je größer der Widerstand ist.

Die dritte Frage ist die: Wie hängt die Erwärmung, die in einem bestimmten Drahtstück erzeugt wird, ab von der Stärke des Stromes? Wir können diese Frage leicht mit unserem Apparat (Fig. 100) beantworten. Schicken wir durch die Spirale einmal einen Strom von 1 Ampere, dann einen Strom von 2 Ampere (indem wir etwa Widerstände, die vorher durch einen Kurbelrheostaten in den Stromkreis eingeschaltet waren, ausschalten und so die Stromstärke vergrößern), dann einen Strom von 3 Ampere, so zeigt sich, daß die Erwärmung der Spirale auch immer größer wird, je größer die Stromstärke ist, und zwar sehr beträchtlich. Wenn statt 1 Ampere 2 Ampere herrschen, so ist die Erwärmung 4mal, wenn 3 Ampere herrschen, ist sie 9mal so groß. Das heißt also: wird die Intensität des Stromes doppelt, dreifach, vierfach so groß, als sie war, so wird die Erwärmung jedes einzelnen Leiterstückes bei sonst gleichen Umständen schon 4-, 9-, 16mal so groß. Die Erwärmung hängt also ab von dem Quadrat der Stromstärke.

Fig. 100.

Diese drei Größen, die Zeit, der Widerstand des Leiterstückes und die Stärke des durchfließenden Stromes, sind aber auch die einzigen, von welchen die Erwärmung abhängt. In jedem Leiterstück ist die in jeder bestimmten Zeit, also z. B. in einer Sekunde, entwickelte Wärmemenge gleich dem Widerstand des Leiterstückes, multipliziert mit dem Quadrat der Stromstärke.

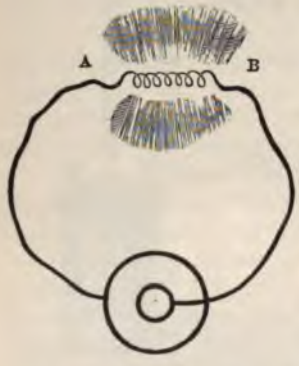
Dieses Gesetz der Wärmeentwickelung durch den galvanischen Strom wurde von Joule zuerst aufgestellt. Man nennt deshalb diese Wärme

auch die Joulesche Wärme, und das eben ausgesprochene Gesetz das Joulesche Gesetz.

Von der Größe der elektromotorischen Kraft der Säule ist die entwickelte Wärmemenge ganz unabhängig. Ob man ein Daniellsches Element anwendet oder eine Batterie von zehn hintereinander geschalteten, also mit 10mal so großer elektromotorischer Kraft, es bleibt die in jedem Leiterstück entwickelte Wärmemenge doch dieselbe, vorausgesetzt, daß man (durch Einschalten von Widerständen) dafür sorgt, daß die Stärke des hindurchgehenden Stromes in beiden Fällen dieselbe bleibt.

Man muß sehr genau darauf achten, daß die Erwärmung in einem Stück eines Leiters außer von der Stromstärke nur abhängt von dem Widerstand eben dieses Stückes allein. In einer einfachen Leitung, durch die ein Strom geht, herrscht, wie wir wissen, zwar überall dieselbe Stromstärke. Die entwickelte Wärmemenge aber ist in den einzelnen Teilen der Leitung verschieden, sobald diese verschiedene Widerstände haben.

Fig. 101.



Die Wärme, die in jedem Stück des Schließungskreises fortwährend entwickelt wird, erhöht nun fortwährend die Temperatur dieses Stückes. Ist der Strom stark genug und der Widerstand des Stückes groß genug, so kann diese Temperaturerhöhung eine so bedeutende sein, daß das Stück anfängt zu glühen, rot, gelb, weiß glüht und schließlich sogar schmilzt. Je geringere Masse ein Stück hat, desto leichter wird seine Temperatur erhöht, da ja die Joulesche Wärme sich nicht auf eine zu große Masse zu verteilen braucht. Je dünner also ein Draht ist, und je größer sein Widerstand ist, desto leichter kann er zum Glühen kommen.

Man kann also durch den elektrischen Strom das Glühen eines Drahtes sehr leicht hervorbringen. Man verbindet z. B. drei Bunsensche Elemente hintereinander und schließt ihre Pole durch einen beliebigen Draht, in welchem sich aber an einer Stelle ein nicht zu langes Stück eines sehr dünnen Drahtes, z. B. eines Platindrahtes, befindet (Fig. 101), der am besten spiralförmig gewunden ist. In den dicken Drähten ist die entwickelte Wärme nicht groß und nicht ausreichend, um diese zum Glühen zu bringen. In dem dünnen Platindraht A B dagegen ist der Widerstand und folglich auch die entwickelte Wärme sehr groß, und da der Draht dünn ist, so reicht die Wärme aus, um den Draht zum hellen Weißglühen zu bringen.

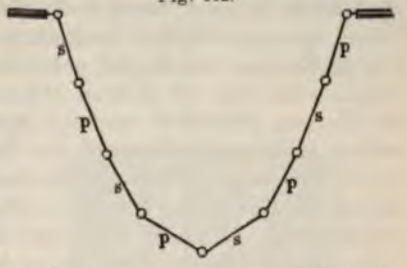
Hat man sehr starke Ströme, so kann man ganze Kupferbarren kiloweise zum Schmelzen bringen, wie es in New York unbeabsichtigterweise bei der ersten Einrichtung von elektrischen Zentralstationen geschah.

Wie wir oben auf S. 80 gesehen haben, ist der spezifische Widerstand des Platins größer als der des Silbers. Leitet man also einen Strom durch eine Reihe von gleich langen und gleich dicken Platinstücken p und Silberstücken s, wie Fig. 102 zeigt, so ist der Widerstand und daher auch die Erwärmung jedes Platinstückes größer als die jedes Silberstückes. Man

kann also, wenn man den Strom passend stark wählt, bewirken, daß die Platindrähte alle ins Glühen kommen, die Silberdrähte aber noch dunkel bleiben. Solche Versuche kann man in verschiedenen Variationen anstellen.

Diese Joulesche Wärme, durch welche Teile des Stromkreises mehr oder minder stark erwärmt und sogar zum Glühen gebracht werden, wird vielfach benutzt. Man bedient sich dieser Eigenschaft in der Medizin, wo man darauf das galvanokaustische Verfahren gegründet hat; man bedient sich dieser Wirkung zur Entzündung von Sprengmaterialien. Man benutzt diese Wirkung zu Zwecken des Heizens und Kochens, wie im zweiten Abschnitt ausführlich gezeigt werden wird. Endlich hat diese Eigenschaft des Stromes ihre wichtigste Anwendung dadurch gefunden, daß man durch Edison gelernt hat, sie zum Beleuchten von Wohnungen zu benutzen.

Fig. 102.



Die Glühlampen, wie man die auf diesem Prinzip beruhenden Lampen nennt, bestehen im wesentlichen nur aus einem dünnen Kohlenstreifchen, welches gewöhnlich hufeisenförmig gebogen oder geschlungen und in ein (luftleeres) Glasgefäß eingeschlossen ist. Fig. 103 zeigt vier solcher Glühlampen für 5, 10, 16, 25 Kerzenstärke. Durch den Kohlenfaden wird ein Strom hindurch gesendet, und da das Kohlenstreifchen sehr großen Widerstand hat, so kommt es durch den Strom in helles Glühen. Der Kohlenfaden ist zu diesem Zweck an den Kontakten des Glaskörpers befestigt, nämlich mit dem einen Ende an dem metallischen Gewinde am Fuß des Glases, mit dem anderen Ende an dem von dem Gewinde isolierten Metallboden des Glases. Die Glühlampen werden in die zu ihnen passenden Fassungen eingesetzt, von denen Fig. 104 zwei Formen zeigt. Sie bestehen aus der zu dem Gewinde der Lampe passenden Mutter aus Metall und einer davon isolierten Metallfeder am Boden. Der Boden einerseits, die Metallmutter andererseits werden mit den von der Stromquelle kommenden Leitungen verbunden, und wenn die Lampe eingeschraubt ist, so daß Boden und Boden sich berühren, so geht der Strom durch die Lampe, bei geringem Herausdrehen der Lampe aus der Fassung ist er

Fig. 103.

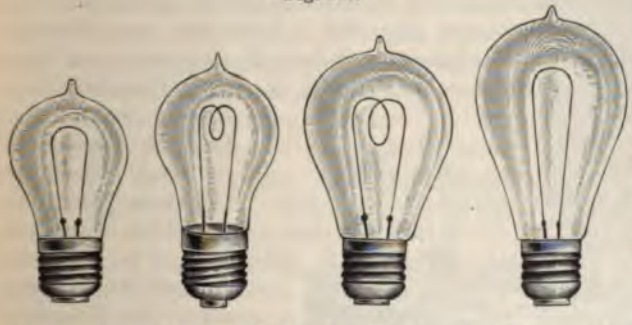
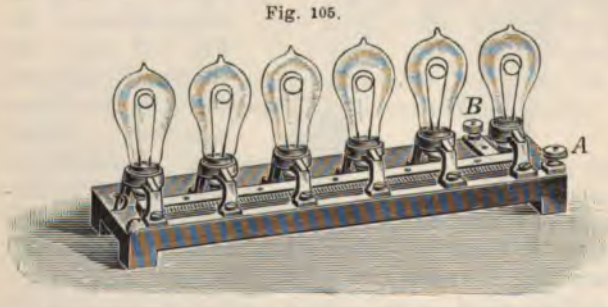


Fig. 104.

unterbrochen. Hauptsächlich werden die Glühlampen dort benutzt, wo durch eine Zentrale oder eine eigene Maschine elektrischer Strom verteilt wird, und zwar hat sich in den meisten Fällen die Einrichtung eingebürgert, daß die Zentrale oder die Maschine eine elektrische Spannung von 110 Volt erzeugt. Zwischen solche zwei Leiter, welche 110 Volt Spannung besitzen, werden die Glühlampen, alle parallel, geschaltet. In diesem gewöhnlich vorkommenden Fall erhalten dann die Lampen für 16 Kerzen, welche die gebräuchlichsten sind, etwa 0,5 Ampere Stromstärke, die von 25 Kerzen etwa 0,8 Ampere, die kleineren von 5 und 10 Kerzen etwa 0,18 und 0,3 Ampere. Man kann aus diesen Angaben sofort berechnen, wie groß der Widerstand dieser Lampen ist, wenn sie im Glühen sind. Dieser Widerstand muß ja nach dem Ohmschen Gesetz gleich der Spannung von 110 Volt, dividiert durch die verbrauchte Stromstärke sein. So findet man, daß die 4 Lampen der Reihe nach etwa 600, 370, 220, 140 Ohm Widerstand besitzen.

Ausführlich handelt über die Glühlampen das 6. Kapitel im zweiten Teil dieses Werkes. Hier sei nur eine Anwendung der Glühlampen für physikalische Zwecke erwähnt. Da die Glühlampen große Widerstände haben, billig sind und verhältnismäßig starke Ströme vertragen, so kann man sich mit ihnen auf billige Weise Rheostaten zusammensetzen, welche für große Stromstärken geeignet sind, Rheostaten, welche, wenn sie aus Drähten gefertigt wären, außerordentlich kostspielig wären. Einen solchen Glühlampenrheostat zeigt Fig. 105. Zwischen zwei Metallschienen A C und B D sind 6 Glühlampen mit ihren Fassungen parallel geschaltet. Hat jede etwa 240 Ohm Widerstand, so ist der Gesamtwiderstand, wenn alle Lampen eingeschaltet sind, 40 Ohm. Da ferner jede zum normalen Brennen etwa $^1/_2$ Ampere verbraucht, so kann man bei Parallelschaltung aller 6 Lampen bei 110 Volt Spannung 3 Ampere Stromstärke durch die Schienen und die Leitung senden. Durch Herausdrehen einer oder mehrerer Lampen aus ihren Fassungen wird der Widerstand vergrößert und die durchgehende Stromstärke vermindert bis auf etwa 0,5 Ampere. Eine größere Form eines solchen Lampenrheostaten (von Siemens & Halske) zeigt Fig. 106. In diesem sind 3mal zwei Reihen von Glühlampen angebracht, von denen jede Reihe die Lampen parallel geschaltet enthält, während die Reihen selbst nach Belieben hintereinander oder parallel geschaltet werden können. In der Mitte des Rheostaten sind die erforderlichen Ausschalter und Umschalter angebracht.

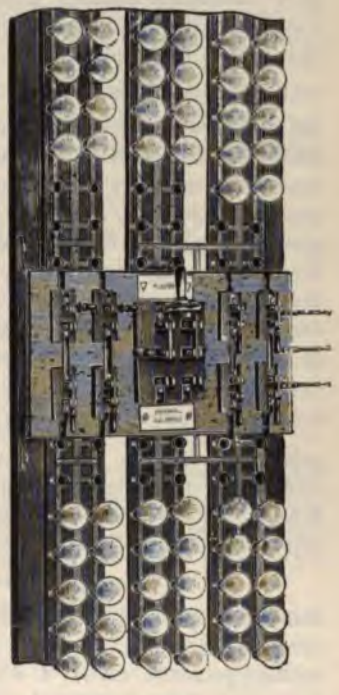
Fig. 105.



Die Tatsache, daß ein Strom seinen eigenen Stromkreis erwärmt, ist nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie, dem allgemeinsten Satz, den die Physik aufzuweisen hat, direkt einzusehen, ja

es läßt sich aus diesem Prinzip sogar das Joulesche Gesetz direkt ableiten. Das Gesetz der Erhaltung der Energie sagt nämlich aus, daß bei allen physikalischen Erscheinungen Energie weder gewonnen noch verloren gehen kann. Die Hervorbringung einer jeden physikalischen Erscheinung erfordert einen gewissen Aufwand von Arbeit, die Vernichtung derselben muß daher eine ebenso große Menge Arbeit freimachen. In einem elektrischen Strom gleichen sich nun fortwährend die Elektrizitäten aus, welche vom Zinkpol zum Kupferpol und vom Kupferpol zum Zinkpol fließen, sie vereinigen sich fortwährend gegenseitig. Da man nun zur Erzeugung oder, besser gesagt, zur Trennung der Elektrizitäten Arbeit aufwenden muß, so muß die Vereinigung derselben fortwährend Arbeit freimachen. Leistet nun der Strom nicht wirklich mechanische Arbeit (und wir werden sehen, daß wir ihn dazu benutzen können, wenn wir wollen), so verwandelt sich die gesamte frei gewordene Arbeitsmenge in Wärme. Dies ist der tiefere physikalische Grund dieser Jouleschen Wärmeentwickelung. Wenn daher der galvanische Strom irgend eine andere Arbeit leistet, wenn er nicht bloß in seinem Kreise ohne Arbeit zu leisten fließt, so muß auch die in dem Stromkreis entwickelte Wärmemenge eine kleinere werden. Dies ist der Grund, warum wir bei Anführung der über die Joulesche Wärme ermittelten Tatsachen uns darauf beschränkt haben, anzunehmen, daß der galvanische Strom nur durch Leiter erster Klasse, durch Metalle oder Kohle fließt. Bei dem Durchgang durch Flüssigkeiten hat nämlich der Strom gewöhnlich noch andere Arbeit zu leisten. Deswegen gelten dann die entwickelten Sätze für Flüssigkeiten im allgemeinen nicht. Wenn aber der Strom durch eine Flüssigkeit hindurchfließt, ohne daß er Arbeit bei ihr zu leisten hat, dann folgt die Wärmeentwickelung auch dabei dem Jouleschen Gesetz.

Fig. 106.



Wir können aber auch nicht bloß allgemein die Tatsache der Erwärmung, sondern direkt das Joulesche Gesetz durch Überlegungen ableiten, die von dem Prinzip der Erhaltung der Energie ausgehen. Wenn eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. 5 Coulomb, sich auf einem Körper befindet, auf dem die Spannung eine bestimmte Größe hat, z. B. 3 Volt, so wissen wir aus S. 20, daß die in diesem elektrischen Körper steckende Energie gleich ist 15 Volt $\times$ Coulomb, oder daß er eine Arbeit von $\frac{15}{9{,}81}$ Kilogrammeter leisten kann. Diese Arbeit mußte aufgewendet werden, um die 5 Coulomb auf die Spannung 3 Volt zu bringen, diese Arbeit wird auch wieder frei, wenn der Körper leitend mit der Erde ver-

bunden wird, also wenn die 5 Coulomb auf die Spannung Null kommen. Wird aber die Elektrizität nicht auf die Spannung Null gebracht, sondern auf eine andere Spannung, die geringer ist als 3 Volt, also z. B. auf 1 Volt, so ist die Arbeit, die dabei frei wird, $5 \times (3 - 1) = 10$ Volt-Coulomb gleich $\frac{10}{9{,}81}$ Kilogrammeter. (Man multipliziert also nicht bloß die Zahlen miteinander, sondern auch die Benennungen. 1 Volt-Coulomb ist eine gewisse Arbeit, nämlich $= \frac{1}{9{,}81}$ Kilogrammeter.) Allgemein: Wenn eine bestimmte Anzahl Coulomb von einer höheren Spannung zu einer niederen fällt und die Spannungen in Volt gemessen werden, so ist die dabei frei werdende Arbeit gleich:

Anzahl der Coulomb $\times$ Differenz der Volt (Benennung: Volt-Coulomb).

In jedem Stück eines Drahtes nun, durch den ein elektrischer Strom geht, fließt fortwährend die positive Elektrizität von der höheren Spannung nach der niederen Spannung, und die Differenz der Spannungen ist ja gerade das, was wir den Spannungsverlust in diesem Stück genannt haben. Es wird also dabei stets Arbeit frei. In jeder Sekunde fließt so eine gewisse Menge Elektrizität ab und die Anzahl der Coulomb, die in einer Sekunde abfließen, haben wir ja als die Stärke des Stromes bezeichnet und in Ampere ausgedrückt. Daher ist die in jeder Sekunde in einem stromdurchflossenen Drahtstück frei werdende Arbeit gleich

Spannungsverlust in Volt $\times$ Stromstärke in Ampere.

Die Größe der von irgend einer Maschinerie in jeder Sekunde geleisteten Arbeit nennt man den Effekt dieser Maschinerie. Es besitzt also ein elektrischer Strom in jedem Stück seiner Bahn einen gewissen Effekt, und wir können sagen, indem wir wieder die Benennungen auch multiplizieren, der Effekt in einem Stromstücke ist gleich

Spannungsverlust $\times$ Stromstärke (Volt-Ampere).

Die Größe eines Effekts mißt man nun gewöhnlich in Watt, wobei 1 Watt derjenige Effekt ist, bei dem in jeder Sekunde der 9,81. Teil eines Kilogrammmeters geleistet wird. 1 Watt ist daher gerade gleich 1 Volt-Ampere und in unserem Stromstück herrscht der Effekt

Spannungsverlust $\times$ Stromstärke (Benennung: Watt).

Statt dieses Ausdrucks für den Effekt in einem Drahtstück kann man auch folgenden bilden. Da der Spannungsverlust in einem Drahtstück gleich dem Produkt aus seiner Stromstärke in Ampere und seinem Widerstand in Ohm ist, so ist der Effekt auch gleich

Quadrat der Stromstärke $\times$ Widerstand (Benennung: Watt).

Für große Effekte nimmt man als Einheit jetzt 1 Kilowatt, welches gleich 1000 Watt ist, so daß unser Stromstück auch den Effekt hat

$$\frac{\text{Spannungsverlust} \times \text{Stromstärke}}{1000} \text{ Kilowatt.}$$

Der Effekt von Maschinen wird in der Technik gewöhnlich in Pferdekräften ausgedrückt. Unter einer Pferdekraft (PS) versteht man den-

jenigen Effekt, bei welchem in jeder Sekunde 75 Kilogrammeter Arbeit geleistet werden. Da 1 Kilowatt der Effekt ist, bei dem in der Sekunde $\frac{1000}{9{,}81} = 102$ Kilogrammeter Arbeit geleistet werden, so ist 1 Kilowatt gleich 1,36 Pferdekräften und daher ist auch der Effekt eines Stromstückes leicht in Pferdekräften auszudrücken. Fließt also ein Strom mit der Stromstärke 20 Ampere durch einen Draht, an dessen Enden der Spannungsunterschied 150 Volt ist, so ist der elektrische Effekt dieses Stromstückes

$$20 \times 150 = 3000 \text{ Watt} = 3 \text{ Kilowatt} = 4{,}08 \text{ PS}.$$

Wenn nun dieser Effekt nicht wirklich dazu benutzt wird, um z. B. Maschinen in Gang zu setzen und dadurch Arbeit zu leisten, so verwandelt er sich ganz in Wärme, in jeder Sekunde wird durch diesen Effekt eine gewisse Wärmemenge entwickelt, und die Größe dieser per Sekunde erzeugten Wärmemenge in einem Drahtstück ist also gleich dem Spannungsverlust in diesem Drahtstück, multipliziert mit der Stromstärke, oder, was dasselbe ist, auch gleich

Quadrat der Stromstärke $\times$ Widerstand des Drahtstückes,

und dies ist das Joulesche Gesetz, das also aus dem Satz von der Erhaltung der Energie folgt.

In jeder Sekunde kann also der Strom in jedem Drahtstück diese bestimmte Arbeit leisten und in dem ganzen Stromkreis daher die Summe aller der einzelnen Arbeiten. Selbstverständlich muß irgendwo im Stromkreise ein Grund dafür, eine Quelle für diese Arbeit vorhanden sein, und wir werden sehen, daß die Quelle dieser Arbeit in den chemischen Kräften der galvanischen Elemente steckt.

Die Joulesche Wärme ist selbstverständlich immer dieselbe, mag nun der Strom in der einen Richtung durch die Leitung gehen oder in der anderen. Es ist deshalb auch, wenn man Drähte zum Glühen bringen will, ganz gleichgültig, in welcher Richtung man den Strom durch die Drähte sendet.

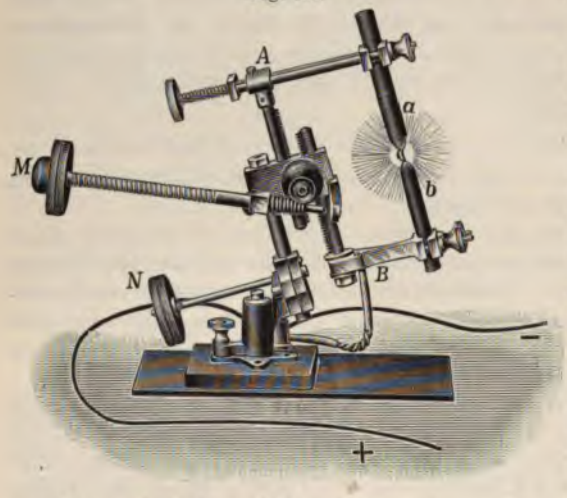
Im Jahre 1821 beobachtete der englische Physiker Davy eine höchst merkwürdige und glänzende Erscheinung, welche von dieser Jouleschen Wärmeentwickelung mit abhängt. Als er nämlich die Pole einer sehr starken galvanischen Batterie mit zwei Stäben aus Kohle verband und diese Kohlen aneinander brachte, daß sie sich berührten, so ging der starke elektrische Strom durch sie hindurch. Als er aber die Enden der beiden Kohlen danach voneinander etwas entfernte, so daß eigentlich der Strom unterbrochen sein mußte, so entstand zwischen den Kohlen ein außerordentlich helles Licht. Es kamen die Enden der Kohlen in helle Weißglut und ebenso glühte die Luft bläulich zwischen ihnen und der Strom war nicht unterbrochen, sondern dauerte an.

Diese Erscheinung nennt man den elektrischen Lichtbogen oder Flammenbogen und das Licht selbst daher Bogenlicht. Es erklärt sich die Erscheinung daraus, daß die Kohlen, solange sie sich noch berühren, durch den Strom erwärmt werden und wenn sie dann von einander getrennt werden, zum Teil verdampfen, d. h. daß Kohlenpartikelchen von ihnen durch die trennende Luftschicht hindurchfliegen, welche nun auch den Übergang des elektrischen Stromes vermitteln. Aber

in dieser Kohlendampfschicht findet der Strom einen großen Widerstand und es gehört daher einerseits eine große Spannung des Stromes dazu, um diesen Widerstand zu überwinden, und andererseits geht diese Überwindung des großen Widerstandes nur mit Entwickelung von Wärme vor sich, die hierbei so stark wird, daß die Enden der Leiter, zwischen denen die Luft sich befindet, und die Luft selbst ins Glühen kommen.

Wenn man also eine galvanische Säule von ziemlich großer elektromotorischer Kraft, z. B. 40 bis 60 Volt, anwendet und, nachdem der Strom durchgegangen ist, an einer Stelle den leitenden Kreis unterbricht (es braucht das nicht gerade zwischen zwei Kohlenstäben zu sein), so daß sich eine kleine Luftstrecke zwischen den Unterbrechungsstellen befindet, so fließt also der elektrische Strom noch weiter durch die trennende Luftschicht hindurch unter Entwickelung des Lichtbogens. Man bezeichnet die Leiter, zwischen denen die glühende Luftschicht sich befindet, als die Elektroden. Je leichter zerteilungsfähig die Substanz der Elektroden ist, um so leichter bildet sich der Lichtbogen.

Fig. 107.

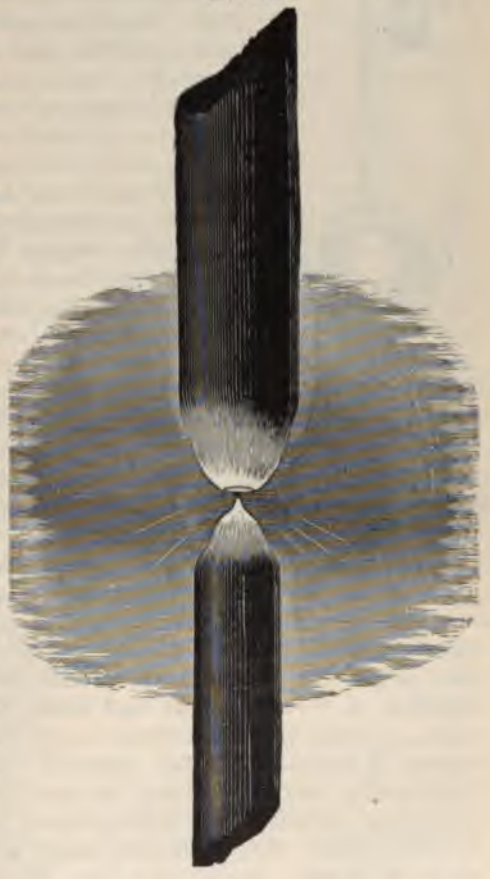


Sehr gut zeigen diese Erscheinungen Elektroden von Zink, von Eisen oder von Quecksilber. Am schönsten und glänzendsten wird aber dieses Phänomen, wenn man den Strom zwischen Kohlen durch Luft übergehen läßt. Immer aber müssen die Elektroden einander zuerst berühren und dann erst getrennt werden, damit der Lichtbogen entsteht. Eine Abbildung einer zur Erzeugung des Lichtbogens brauchbaren Einrichtung gibt Fig. 107. Bei + und — kommen die Leitungsdrähte von der galvanischen Batterie und der Strom geht durch die Metallhalter A und B und zu den runden Kohlenstäben a und b, die zuerst in Berührung miteinander sind, damit der Strom überhaupt fließen kann, und die dann durch Drehen des Griffes M getrennt und in geringer Entfernung von einander gehalten werden und zwischen sich eine kleine Luftschicht haben. Ist nun die Spannung an den Kohlenenden groß genug, so geht zwischen diesen der Strom über und bildet dabei den Flammenbogen, wie er in der Figur angedeutet ist.

Von den Enden der Kohlen, insbesondere von demjenigen, welches mit dem positiven Pol der Batterie verbunden ist, fliegen die glühenden Teilchen zu dem anderen über. Hat man die Kohlenenden zuerst beide zugespitzt, so ist nach kurzer Zeit die Spitze an der positiven Kohle verschwunden und es hat sich an ihrer Stelle ein Krater gebildet, von welchem aus die Teilchen zur negativen Kohle überfliegen. Die negative Kohle

bleibt spitz. Nachdem der Flammenbogen eine Zeitlang bestanden hat, sehen die Enden der Kohlen so aus, wie es Fig. 108 zeigt. Die Temperatur der weißglühenden Kohlenenden ist eine sehr bedeutende. Die positive Kohle, welche den Krater bildet, hat eine Temperatur von etwa 3700, die negative, zugespitzte Kohle eine solche von etwa 2500 ° C. Die beiden Kohlen brennen natürlich durch die Hitze ab, die Kohle verbindet sich in der Hitze mit dem Sauerstoff der Luft zu Kohlenoxyd und Kohlensäure, und da von der positiven Kohle noch außerdem eine Menge von Teilchen gegen die negative hingeschleudert werden, so wird die positive Kohle rascher kleiner als die negative. Erfahrungsgemäß brennt sie etwa doppelt so rasch ab als die negative. Warum die eine Kohle rascher abbrennt als die andere, ist noch nicht aufgeklärt. Vermutlich steckt darin noch ein wichtiges Geheimnis. Durch das Abbrennen der Kohlen wird der Abstand, die Luftschicht, zwischen ihnen immer größer, und der Flammenbogen würde erlöschen, wenn man nicht dafür sorgt, daß die Kohlen einander in dem Maße wieder genähert werden, wie sie abbrennen. Das kann man natürlich einige Zeit mechanisch mit der Hand machen. Um den Lichtbogen aber dauernd zu erhalten, muß man für selbsttätige Vorrichtungen sorgen. Derartige sind in großer Anzahl ersonnen und im zweiten Teil dieses Werkes, Kapitel 5, werden wir die hauptsächlichsten dieser Konstruktionen, die elektrischen Bogenlampen, besprechen.

Fig. 108.



Das elektrische Bogenlicht übertrifft an Helligkeit alle anderen Lichtquellen, die wir auf Erden bis jetzt erzeugen können, ganz bedeutend. Es ist deshalb ganz außerordentlich geeignet, um zur Beleuchtung von Städten, von Straßen und Plätzen zu dienen.

Daß man auch zwischen anderen Leitern als Kohlen den Lichtbogen erzeugen kann, ist oben bereits erwähnt worden. Für physikalische, insbesondere optische Versuche hat sich der Lichtbogen zwischen Elektroden aus Quecksilber von Wichtigkeit erwiesen. Dieser wird jetzt

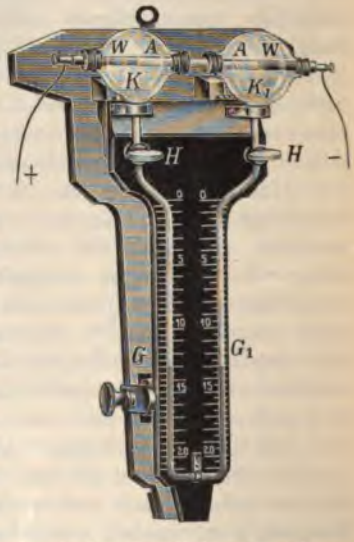
leicht und bequem in der Quecksilberbogenlampe von Arons erzeugt, die in Fig. 109 abgebildet ist. Die ganze Lampe besteht aus Glas oder noch besser aus Quarz, welches man jetzt in passende Formen zu bringen im stande ist. Man sieht das Quecksilber unten in den beiden Schenkeln, in welche durch die Ansätze Platindrähte eingeführt sind. Diese dienen zur Verbindung mit einer Batterie von mindestens 60 Volt Spannung. Die beiden Quecksilberkuppen berühren sich zunächst nicht. Durch langsames Neigen der Lampe kann man das Quecksilber aus dem einen Schenkel in den anderen überfließen lassen und sobald die bisher getrennten Quecksilbermassen sich berühren, geht der Strom hindurch und wenn die Röhre nun wieder vertikal gestellt wird, so entwickelt sich über den beiden Kuppen bei R der Lichtbogen, der hellgrün leuchtet und der nun stundenlang andauert. Zerlegt man das Licht dieses Bogens durch ein Prisma, so findet man in demselben die hellen grünen Quecksilberlinien. Insbesondere ist das Licht aber reich an ultravioletten Strahlen, und um diese nicht durch Glas zu sehr zu schwächen, macht man eben jetzt solche Lampen (in etwas anderer Form) aus Quarz, die noch den Vorzug haben, nicht zu zerbrechen.

Fig. 109.

Während die bisher besprochene Joulesche Wärme in jedem Stück eines Stromkreises erscheint und eben nur das Äquivalent für die freiwerdende Arbeit ist, zeigt der elektrische Strom in manchen Fällen noch Wärmewirkungen anderer Art.

Wenn man den Schließungsdraht eines galvanischen Elementes so einrichtet, daß er nicht aus einem Metall, sondern aus zwei verschiedenen, aneinander gelöteten oder sonst fest miteinander verbundenen Metallen, z. B. aus Kupfer und Eisen besteht, so tritt an der Lötstelle noch eine andere Wärmewirkung auf, nämlich eine Erwärmung oder Abkühlung, je nach der Richtung, in welcher der Strom durch die Lötstelle fließt. Am kräftigsten zeigt sich diese Wirkung, wenn man den Strom durch einen Stab gehen läßt, der aus einem Wismutstab und einem Antimonstab zusammengesetzt ist. Geht der Strom vom Wismut zum Antimon, so wird die Lötstelle abgekühlt; geht er vom Antimon zum Wismut, so wird sie erwärmt. Um diese Wirkungen, die immer recht schwach sind, deutlich zu zeigen, bedient man sich vorteilhaft des Apparates Fig. 110, der von Ernecke-Berlin hergestellt wird. An einen Antimonstab A A sind an beiden Enden kleinere Wismutstäbe W angelötet und der zusammengesetzte Stab ist

Fig. 110.



in die beiden Kugeln K und K_1 so durch Kautschukstopfen eingesetzt, daß die eine Lötstelle W A sich in der einen, die andere A W sich in der anderen Kugel befindet. Die Kugeln sind durch ein U-förmiges Rohr, in dessen Biegung unten sich Wasser befindet, miteinander verbunden. Wird durch die Drähte + — ein Strom (etwa von einem Daniell) von links nach rechts durch den Apparat geschickt, so entsteht in K eine Abkühlung, in K_1 eine Erwärmung. Die Luft in K_1 dehnt sich aus, die in K zieht sich zusammen, und wenn die Hähne H H, die nur zur vorherigen Druckausgleichung dienen, geöffnet sind, so sinkt das Wasser bei G_1 und steigt bei G. Man nennt diese Wirkung des Stromes nach ihrem Entdecker, Peltier, die Peltiersche Wirkung und die positive oder negative erzeugte Wärme die Peltiersche Wärme. Die Peltiersche Wärme ist in unserem Falle positiv, also eine wirkliche Erwärmung, wenn der Strom vom Antimon zum Wismut geht; negativ, also eine Abkühlung, wenn der Strom vom Wismut zum Antimon geht.

Ganz so wie bei Wismut und Antimon tritt immer bei je zwei zusammengelöteten Metallen die Peltiersche Wärme auf, wenn ein Strom durch sie hindurchgesendet wird. In welcher Richtung der Strom fließen muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird, das hängt von der Natur der zusammengelöteten Metalle ab. Die Erfahrung hat nun gelehrt, daß immer, wenn Wismut mit einem anderen Metall, Antimon, Eisen, Silber, Kupfer, Gold u. s. w. zusammengelötet ist, die Lötstelle abgekühlt wird, wenn der positive Strom vom Wismut zu dem anderen Metall durch die Lötstelle geht. Es lassen sich überhaupt alle Metalle in eine Reihe so ordnen, daß die Lötstelle immer abgekühlt wird, wenn der Strom vom vorhergehenden zum folgenden Metall geht. In der folgenden Reihe sind einige Metalle so zusammengestellt. Man nennt sie die thermoelektrische Spannungsreihe.

Die thermoelektrische Spannungsreihe.

Wismut,
Quecksilber,
Platin,
Gold,
Kupfer,
Zinn,
Blei,
Zink,
Silber,
Eisen,
Antimon.

Wenn man z. B. einen Stab hat, der aus Eisen und Kupfer zusammengelötet ist, und wenn man wissen will, in welcher Richtung man den Strom hindurchsenden muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird, so findet man aus obiger Reihe, daß man den Strom vom Kupfer durch die Lötstelle zum Eisen senden muß. Denn Kupfer steht in der Reihe vor dem Eisen. Schickt man den Strom in der entgegengesetzten Richtung hindurch, so wird die Lötstelle erwärmt.

Die Joulesche Wärme ist in jedem Stück des Schließungsdrahtes

vorhanden, während die Peltiersche Wärme nur an der Verbindungsstelle zweier verschiedenen Metalle auftritt; ferner ist die Joulesche Wärme stets positiv, die Peltiersche aber je nach der Richtung des Stromes positiv oder negativ.

Bei dieser Peltierschen Wirkung des elektrischen Stromes stoßen wir nun zum ersten Male auf die Umkehrbarkeit von elektrischen Vorgängen.

Ebenso nämlich, wie ein elektrischer Strom an der Lötstelle zweier Metalle eine besondere Erwärmung oder Abkühlung hervorbringt, je nach seiner Richtung, ebenso bringt umgekehrt auch eine äußere Erwärmung oder Abkühlung der Lötstelle zweier zu einem geschlossenen Kreis verbundenen Metalle einen elektrischen Strom hervor.

Man kann dies sehr leicht zeigen. In Fig. 111 ist WW ein Wismutstreifen, an welchem ein Kupferbügel KK angelötet ist (bei m und n).

Fig. 111.

In dem Hohlraum zwischen beiden Metallen befindet sich eine drehbare aufgesetzte Magnetnadel a. Sowie man nun die eine Lötstelle, etwa n, erwärmt, entsteht ein elektrischer Strom, den man daraus erkennt, daß er die Magnetnadel ablenkt. Der Strom fließt in dem ganz geschlossenen metallischen Kreise, und zwar hat der positive Strom die Richtung des Pfeiles von dem Wismut durch die warme Lötstelle zum Kupfer und von diesem zurück. Ganz ebenso entsteht ein Strom, wenn man die Lötstelle n kälter macht als die andere, indem man sie z. B. mit Eis umgibt. Dann fließt der positive Strom bei n entgegengesetzt, nämlich vom Kupfer durch die kalte Lötstelle zum Wismut, also auch wieder durch die wärmere Lötstelle bei m vom Wismut zum Kupfer. Man nennt diese Ströme Thermoströme oder thermoelektrische Ströme. Sie wurden von Seebeck im Jahre 1823 entdeckt. Wir haben also hier galvanische Ströme, welche nicht in galvanischen Elementen entstehen, sondern welche nur durch einfache Wirkung der Wärme hervorgebracht werden. Sobald man irgend zwei verschiedene Metalle zu einem geschlossenen Kreis zusammenlötet und die eine Lötstelle auf eine andere Temperatur bringt als die andere, so fließt in diesem Kreis ein elektrischer Strom. Dieser hat immer eine Richtung, die von der Natur der beiden Metalle abhängt. Wenn man alle Metalle der Reihe nach miteinander in thermoelektrische Verbindung bringt, so kann man sie ebenfalls wieder in eine Reihe so ordnen, daß immer der positive Strom durch die erwärmte Lötstelle vom vorhergehenden zum folgenden Metall geht. Diese Reihe ist dieselbe wie die schon vorher angeführte thermoelektrische Spannungsreihe:

Wismut, Quecksilber, Platin, Gold, Kupfer, Zinn, Blei, Zink, Silber, Eisen, Antimon.

Wismut und Antimon stehen in der Reihe am weitesten auseinander. Sie geben also die stärksten Thermoströme.

Bei einem Thermostrom ist, wie bei jedem anderen galvanischen Strom, zu unterscheiden zwischen der elektromotorischen Kraft, dem Widerstand und der Stromstärke.

Die elektromotorische Kraft in einer solchen Kombination, die man ein Thermoelement nennt, hängt natürlich ab von der Art der beiden Metalle, welche in Verbindung gebracht sind, und sie hängt wesentlich ab von dem Temperaturunterschied der beiden Lötstellen. Je größer der Unterschied der Temperaturen an den beiden Lötstellen ist, desto größer ist die elektromotorische Kraft des Thermoelements. Das gilt jedoch nicht bis zu allen Temperaturen. Bei höheren Temperaturen wird oft die Struktur eines Metalles eine andere und infolgedessen ändert sich auch seine thermoelektrische Differenz mit einem anderen Metall, die elektromotorische Kraft wird dann bei größerer Temperaturdifferenz oft nicht größer, sondern kleiner.

Der innere Widerstand eines Thermoelements ist im allgemeinen sehr klein, da das Element ja nur aus gutleitenden Metallen besteht. Man kann in den Kreis eines Thermoelements beliebige Widerstände einschalten, man kann den Strom eines Thermoelements durch alle möglichen Apparate gehen lassen. Zu dem Zwecke wird der eine der beiden Drähte des Thermoelements aufgeschnitten und seine freien Enden mit dem äußeren Stromkreis verbunden.

Von der elektromotorischen Kraft des Thermoelements und von dem gesamten Widerstand des Stromkreises hängt die Stärke des elektrischen Stromes genau so ab, wie wir es früher bei galvanischen Elementen gefunden haben, d. h. es gilt das Ohmsche Gesetz

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}.$$

Was nun die Größe der elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen anbetrifft, so haben diese nur dann eine bestimmte, unveränderliche Größe, wenn man die beiden Lötstellen des Elements auf konstanter, gleichbleibender Temperatur erhält. Zu dem Ende bringt man z. B. die eine Lötstelle in schmelzendes Eis, wo sie die Temperatur 0^0 bekommt, die andere in siedendes Wasser, wo sie die Temperatur 100^0 bekommt.

Die elektromotorischen Kräfte aller Thermoelemente aus Metallen sind sämtlich nur kleine Bruchteile eines Volt. Wir wollen sie in Millivolt, d. h. in Tausendstel-Volt, ausdrücken. Je nach der Reinheit der Metalle ist die elektromotorische Kraft von Thermoelementen oft sehr verschieden, sie hängt auch davon ab, ob die Metalle hartgezogen oder weich angewendet werden. Im folgenden sind eine Anzahl von Metallen mit Quecksilber kombiniert und ihre elektromotorischen Kräfte angegeben, wenn die Temperaturdifferenz der Lötstellen 100^0 beträgt. Dabei zeigt das Zeichen + an, daß der erzeugte Thermostrom durch die

warme Lötstelle vom Quecksilber zum anderen Metall geht, das Zeichen —, daß er durch die warme Lötstelle vom anderen Metall zum Quecksilber geht.

Elektromotorische Kraft in Millivolt (zwischen 0 und 100 °).

Quecksilber-Wismut	— 6,70	
„ -Nickel	— 1,66	
„ -Kobalt	— 1,53	
„ -Neusilber	— 1,08	
„ -Platin	+ 0,004	bis + 0,59
„ -Aluminium	+ 0,36	
„ -Zinn	+ 0,39	
„ -Magnesium	+ 0,39	
„ -Blei	+ 0,40	
„ -Messing	+ 0,44	
„ -Kupfer (rein)	+ 0,72	
„ Silber	+ 0,70	
„ -Gold	+ 0,71	
„ -Zink	+ 0,69	bis 0,73
„ -Kohle	+ 0,66	bis 1,45
„ -Kadmium	+ 0,87	
„ -Eisen	+ 1,60	bis 1,73
„ -Antimon	+ 3,38	

Für die thermoelektrischen Kräfte gilt nun erfahrungsgemäß das Gesetz der Spannungsreihe, welches sich so ausdrückt: Sind A und B zwei beliebige Metalle und bezeichnet man die elektromotorischen Kräfte zwischen den zwei Metallen durch A | B, so ist

$$\text{Quecksilber} \mid A + A \mid B = \text{Quecksilber} \mid B.$$

Damit kann man aus den obigen Zahlen für irgend zwei Metalle die elektromotorische Kraft berechnen. Denn es ist

$$A \mid B = \text{Quecksilber} \mid B - \text{Quecksilber} \mid A.$$

Nehmen wir z. B. als Metall A das Neusilber, als Metall B das Eisen, so ist

$$\begin{aligned} \text{Neusilber} \mid \text{Eisen} &= \text{Quecksilber} \mid \text{Eisen} - \text{Quecksilber} \mid \text{Neusilber} \\ &= \quad 1{,}60 \qquad\qquad + 1{,}08 \\ &= + 2{,}68 \text{ Millivolt.} \end{aligned}$$

Das positive Zeichen zeigt an, daß der Strom durch die warme Lötstelle vom Neusilber zum Eisen geht.

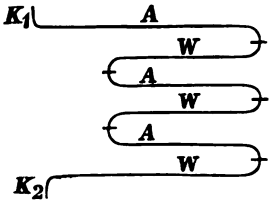
Die obige Kombination Wismut | Kupfer hat, wie man ebenso berechnen kann, die elektromotorische Kraft 7,42 Millivolt, die Kombination Wismut-Antimon sogar 10,08 Millivolt.

Viel stärkere thermoelektrische Kräfte erhält man, wenn man einige Halbmetalle wie Tellur und Selen oder Schwefelmetalle untereinander oder mit Kupfer in thermoelektrische Berührung bringt. Nimmt man z. B. Kupferkies und lötet ihn mit Kupfer zusammen und bringt die eine Lötstelle auf 100 °, die andere auf 0 °, so hat dieses Thermoelement eine elektromotorische Kraft von 66,6 Millivolt, bei einer Temperaturdifferenz von 150 ° gar von 100 Millivolt. Ebenso hat z. B. das Thermoelement

Kupferkies—Schwefelkies eine elektromotorische Kraft von 166,6 Millivolt. Zu wirksamen Thermoelementen sind diese Kombinationen aber kaum zu benutzen, weil der Kupferkies und Schwefelkies eine sehr geringe Leitungsfähigkeit besitzen, so daß die Stromstärke doch sehr klein wird, trotz der verhältnismäßig großen elektromotorischen Kraft.

Die elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen werden um so größer, je größer der Temperaturunterschied der Lötstellen ist, solange eben die Struktur der Metalle nicht selbst merklich geändert ist. Oft aber wird bei hohen Temperaturen die Struktur der Metalle so geändert, daß, wenn die eine Lötstelle auf sehr hohe Temperatur gebracht wird, während die andere etwa Zimmertemperatur hat, die elektromotorische Kraft oft nicht nur nicht zu-, sondern sogar abnimmt, so daß sie bei vielen Kombinationen sogar bei gewissen Temperaturen ganz verschwindet. Bei noch höheren Temperaturen tritt zwar wieder eine elektromotorische Kraft auf, aber der Strom fließt dann durch das Thermoelement in umgekehrter Richtung.

Fig. 112.



Um daher einigermaßen hohe elektromotorische Kräfte zu bekommen, kann man gewöhnlich nicht das Mittel benutzen, die Temperaturdifferenz möglichst groß zu machen. Vielmehr muß man ganz ebenso wie bei galvanischen Elementen mehrere Thermoelemente hintereinander verbinden und immer die gleichliegenden Lötstellen derselben erwärmen. Man erhält so eine thermoelektrische Säule oder Thermosäule.

In Fig. 112 ist eine solche Kombination mehrerer Thermoelemente schematisch gezeichnet. Eine Reihe von Antimonstäben A sind an eine Reihe von Wismutstäben W angelötet, so daß immer ein Wismutstab zwischen zwei Antimonstäben liegt. Wenn man nun die gleichliegenden Lötstellen (z. B. rechts) erwärmt, so fließt durch die warmen Lötstellen immer der Strom vom Wismut zum Antimon und die elektromotorischen Kräfte von den einzelnen Lötstellen addieren sich, so daß die in der Figur schematisch dargestellte Kombination eine dreifach so große elektromotorische Kraft hat als ein einzelnes solches Thermoelement. Die freien Enden dieser Säule K_1 und K_2 werden natürlich durch einen beliebigen äußeren Schließungsdraht verbunden.

Fig. 113.

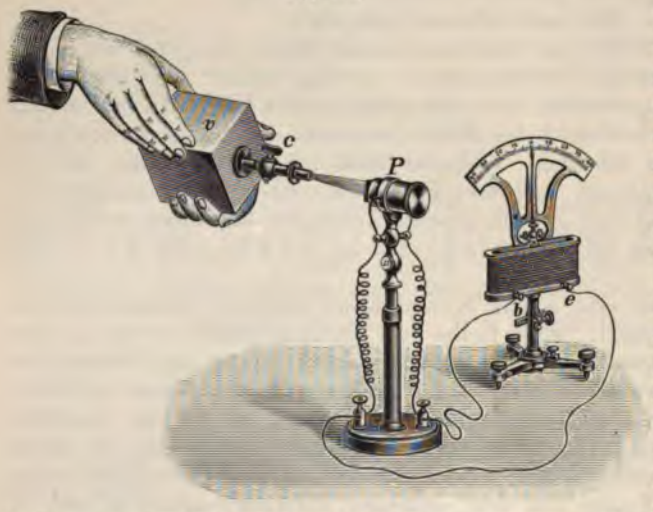
In Fig. 113 ist die Ansicht einer solchen Thermosäule gegeben, bei welcher eine große Menge von Antimon- und Wismutstäbchen aneinander gelötet sind, so daß ihre gleichliegenden Lötstellen alle auf der einen Seite sich befinden und zugleich erwärmt oder abgekühlt werden. Die freien Enden des ersten und letzten Stabes gehen in die Klemmschrauben x und y und können dort durch einen Draht verbunden werden, durch den also dann der Strom von der Thermosäule fließt.

Bei geringen Temperaturdifferenzen ist die elektromotorische Kraft einer Thermosäule, wie oben erwähnt, diesem Unterschied der Temperaturen proportional. Hat man eine Thermosäule mit einem Galvano-

skop verbunden, so wird also immer, wenn die eine Seite der Thermosäule erwärmt oder abgekühlt wird, ein Strom durch die Windungen des Galvanoskops gehen und die Nadel desselben ablenken. In Fig. 114 ist eine solche Verbindung, wie sie häufig benutzt wird, gezeichnet. Man sieht eine Thermosäule P, bei der die eine Reihe von entsprechenden Lötstellen frei ist, damit man sie beliebig erwärmen und abkühlen kann, während die andere durch eine Messinghülse gedeckt ist. Von den Enden der Thermosäule gehen Drähte zu dem Galvanoskop, dessen Nadel die Ströme anzeigt. Man kann nun eine solche Verbindung sehr zweckmäßig dazu benutzen, um geringe Temperaturunterschiede anzuzeigen und auch zu messen.

Die geringste Temperaturerniedrigung oder -erhöhung, welche die freie Seite der Thermosäule erleidet, erzeugt einen Strom, der die Nadel des Galvanometers zum Ausschlag bringt. Wenn man z. B. aus dem Gefäße v, das komprimierte Luft enthält, durch Öffnung des Hahnes c die Luft ausströmen läßt, so wird die ausströmende Luft etwas kälter sein als die umgebende. Trifft diese die freie Seite der Thermosäule P, so wird diese abgekühlt, es entsteht ein Thermostrom nach einer bestimmten Richtung, und die Nadel des Galvanoskops wird abgelenkt und zeigt dadurch die Abkühlung an. Ein gewöhnliches Thermometer würde diese geringe Temperaturveränderung gar nicht zu erkennen geben. Je empfindlicher das Galvanometer ist, das mit der Thermosäule verbunden ist, um so geringere Temperaturdifferenzen kann man so noch nachweisen.

Fig. 114.



Will man die Temperatur an einem P u n k t e allein bestimmen, so kann man nicht eine solche Thermosäule mit ausgedehnter Fläche anwenden, sondern man nimmt dann ein einzelnes Thermoelement, dem man eine zweckmäßige Form dafür gegeben hat. Sehr bequem ist dazu die t h e r m o e l e k t r i s c h e N a d e l (Fig. 115), bei der die zur Untersuchung dienende Lötstelle der beiden Metalle, z. B. Neusilber und Eisen, die Form einer Spitze hat, mit der man in die zu prüfende Stelle, z. B. einer Wurzel oder einer Rinde, hineinsticht.

Die Thermoelemente haben in den letzten Jahren eine ausgedehnte Verwendung erhalten, um s e h r h o h e und s e h r tiefe Temperaturen

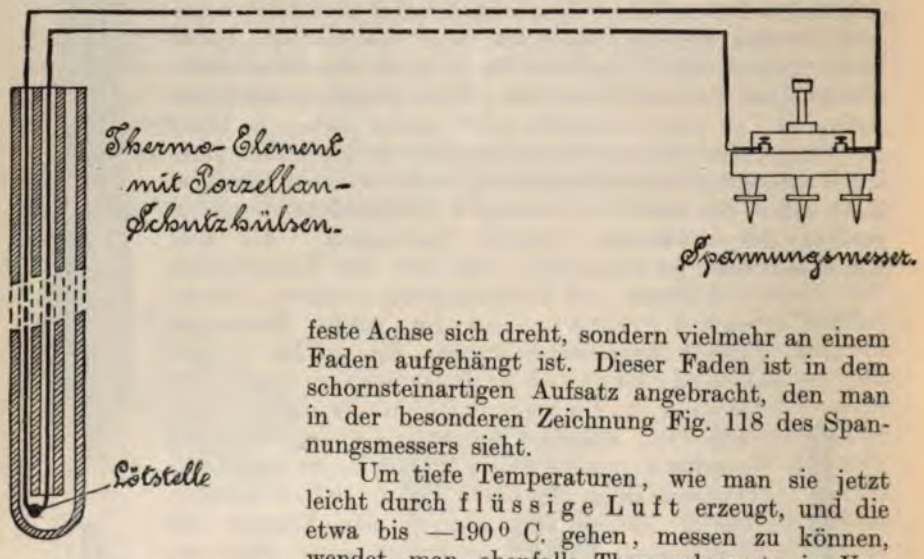
zu messen, für welche die gewöhnlichen Quecksilberthermometer, die nur bis etwa 350° nach oben und etwa —30° nach unten brauchbar sind, nicht mehr ausreichen. Man nennt Apparate, die zur Messung sehr hoher Temperaturen dienen, wie sie etwa in Öfen, in Flammen, in Schmelztiegeln u. s. w. herrschen, Pyrometer. Um ein thermoelektrisches Pyrometer zu konstruieren, muß man Drähte aus zwei Metallen nehmen, deren Struktur sich bei den hohen Temperaturen nicht ändert. Wenn auch die thermoelektrische Kraft zwischen ihnen bei kleiner Temperaturdifferenz gering ist, so wächst dieselbe doch immer mehr, je höher die Temperatur der erwärmten Lötstelle steigt. Man kann daher umgekehrt durch die Messung dieser elektromotorischen Kraft oder der durch sie erzeugten Stromstärke die Temperatur der erwärmten Lötstelle bestimmen. Als sehr brauchbar und unveränderlich hat sich die Kombination von Platin und Platinrhodium erwiesen, welche von Le Chatelier für solche Messungen zuerst angewendet wurde. Ein solches thermoelektrisches Pyrometer von Hartmann & Braun A.-G. in Frankfurt zeigt Fig. 116. Dasselbe besteht aus einem Draht aus chemisch reinem Platin P und einem Draht aus Platinrhodium PR (90 % Platin, 10 % Rhodium), die je 150 cm lang und in eine Armatur aus feuerfestem Material eingezogen sind. Diese Armatur besteht aus mehreren Rohrstücken, welche von einem festen Metallstab durchsetzt und durch eine Mutterschraube und starke Feder zusammengehalten sind. Das Rohr wird mit seinem unteren Teil, wo sich die Lötstelle befindet, in den Raum, z. B. den Ofen, dessen Temperatur gemessen werden soll, eingeführt. Die Porzellanschutzrohre halten Temperaturen bis zu 1600° C. aus und so weit kann man das Thermoelement zu Messungen benutzen. Die freien Enden des Thermoelements sind an die beiden Klemmschrauben, die oben in der Figur sichtbar sind, geführt und sind daher 1½ m von dem hoch erhitzten Raume entfernt, so daß ihre Temperatur leicht durch ein gewöhnliches Thermometer bestimmt werden kann. An die Klemmschrauben werden Drähte angeschraubt, die zu einem Galvanometer führen, das beliebig weit von dem Ofen entfernt, etwa in einem anderen Raum stehen kann. Wenn man den Widerstand des ganzen Stromkreises konstant erhält, so kann man das Galvanometer gleich so eichen, daß man direkt die Grade Celsius abliest; denn jeder bestimmten Temperatur entspricht eine bestimmte Ablenkung der Galvanometernadel und umgekehrt. Eine Einrichtung zu solchen pyrometrischen Messungen ist in Fig. 117 gezeichnet. Das Thermoelement links mit seinen Schutzhüllen ist

Fig. 115.

Fig. 116.

etwa in einen Ofen eingeführt und Verbindungsdrähte führen zu dem Spannungsmesser rechts. Als solches ist hier eines der Präzisionsinstrumente von Siemens & Halske (S. 77) angewendet, bei welchem nur, um die Empfindlichkeit zu erhöhen, die bewegliche Spule nicht um eine

Fig. 117.



feste Achse sich dreht, sondern vielmehr an einem Faden aufgehängt ist. Dieser Faden ist in dem schornsteinartigen Aufsatz angebracht, den man in der besonderen Zeichnung Fig. 118 des Spannungsmessers sieht.

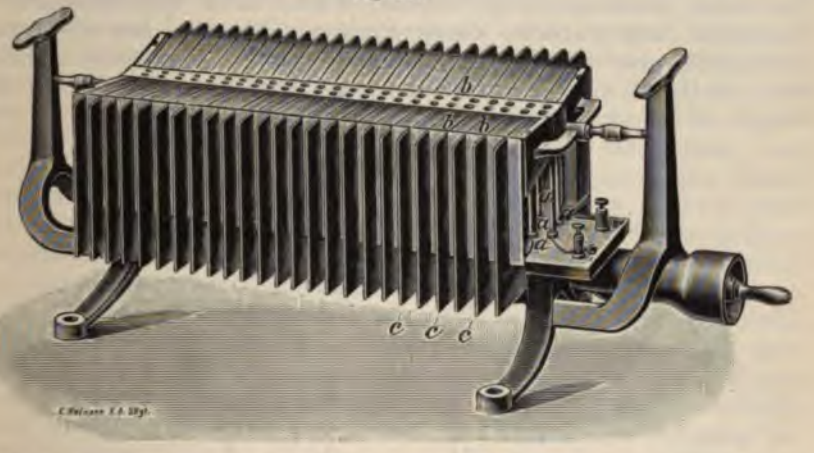
Um tiefe Temperaturen, wie man sie jetzt leicht durch flüssige Luft erzeugt, und die etwa bis —190° C. gehen, messen zu können, wendet man ebenfalls Thermoelemente in Verbindung mit einem Galvanometer an. Für diese Temperaturen eignet sich als Thermoelement die Kombination aus Eisen und Konstantan. Erst durch die Benutzung solcher Thermoelemente ist die Messung sehr hoher und sehr tiefer Temperaturen überhaupt bequem und genau ausführbar geworden.

Fig. 118.

Man hat sich häufig bemüht, Thermosäulen von großer Wirksamkeit zu bauen, d. h. Thermosäulen, welche hohe elektromotorische Kraft mit geringem inneren Widerstand verbinden und dabei haltbar sind. Diese sollten durch Gas oder Kohlenfeuer geheizt werden und dadurch bequem brauchbare Stromerzeuger von verhältnismäßig großer Wirksamkeit geben. Indes ist dieses Problem doch nur in verhältnismäßig kleinem Maßstab, wenn auch schon recht brauchbar, gelöst. Von Gülcher wurde eine bequeme und recht haltbare und praktische Thermosäule konstruiert, welche mit Gas heizbar ist und welche eine elektromotorische Kraft von 4 Volt liefert. Diese Säule ist in Fig. 119 abgebildet. Sie besteht aus 66 hintereinander geschalteten *Elementen,* welche aus Nickel und einer antimonhaltigen Legierung ge-

bildet sind. Das Nickel ist in Form von Röhrchen a, a angewendet, welche zugleich als Gaszuleitungsröhren dienen und innen im Apparat auf einer Platte stehen. Am oberen Ende ist an jedes Röhrchen ein Verbindungsstück aufgelötet, welches nach oben in eine Hülse ausläuft, in welche die antimonhaltige Legierung eingegossen ist. Diese Antimonelektroden sind winkelförmig gebogen b, b und an ihre Enden sind lange Kupferstreifen c, c angelötet, welche zur Abkühlung und zur Verbindung der Elemente dienen. In die oben sichtbaren Löcher werden kleine Schornsteine aus Asbest durch Glimmerröhrchen aufgesetzt. Es ist die Einrichtung so getroffen, daß selbst bei wechselndem Gasdruck

Fig. 119.



die Säule immer konstant erwärmt wird. Der innere Widerstand dieser Säule ist 0,65 Ohm. Sie kann also bei Kurzschließung (S. 66) einen Maximalstrom von $\frac{4}{0{,}65} = 6$ Ampere geben und ist stets durch Anzünden des Gases zum Betrieb bereit und erfordert nur verhältnismäßig wenig Gas (170 l per Stunde).

In den Thermoelementen findet eine direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität statt. Indem nämlich durch die Erwärmung der einen Lötstelle ein Strom durch sie von dem einen Metall zum anderen fließt, wird an dieser Lötstelle selbst negative Peltiersche Wärme erzeugt, also Abkühlung. Die wärmere Lötstelle würde sich also von selbst abkühlen, infolge des erzeugten Stromes, wenn ihr nicht immer von neuem Wärme zugeführt würde. Ebenso muß sich die andere, kältere Lötstelle wegen der dort positiven Peltierschen Wärme von selbst erwärmen, wenn man nicht, etwa durch Eis oder fließendes Wasser, die erzeugte Wärme fortführt. Ein Thermoelement, das einen Strom liefert, verhält sich also ganz wie eine arbeitende Dampfmaschine. Bei dieser arbeitet der Dampf, indem er sich abwechselnd bei hohen Temperaturen ausdehnt und bei tiefen Temperaturen kondensiert wird. Für die Ausdehnung verbraucht er Wärme und diese wird ihm von dem heißen Kessel geliefert, während er bei der Kondensation Wärme erzeugt und diese wird ihm durch das

Kondenswasser entzogen. Es wird also bei dem Thermoelement wie bei der Dampfmaschine an der einen Stelle Wärme zugeführt, an der anderen Wärme entzogen, und die Differenz dieser Wärmemenge verwandelt sich bei der Dampfmaschine in mechanische Arbeit, bei dem Thermoelement in elektrischen Strom. Da die Wärme ein so mächtiges Agens in der Natur ist, da sie die Energie für unsere größten Maschinen liefert, so sollte man glauben, daß man durch Umwandlung von Wärme in Elektrizität auch sehr mächtige elektrische Wirkungen bekommen kann. Das ist aber bisher nicht der Fall. Die elektromotorische Kraft der Thermoelemente ist eine sehr geringe und selbst durch Kombination einer Reihe von solchen Elementen erhält man doch immer noch verhältnismäßig geringe Wirkungen. Das eigentliche Problem, Wärme direkt und ökonomisch in Elektrizität umzuwandeln, dieses Problem, das von der allergrößten Wichtigkeit sowohl in wissenschaftlicher wie in praktischer Hinsicht wäre, ist bisher nicht gelöst, und es erscheint sogar fraglich, ob diese Aufgabe nicht etwa dem Wesen der Elektrizität widerspricht.

6. Kapitel.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. Elektrolyse. Polarisationsströme.

Vielseitiger als alle anderen Naturkräfte steht die Elektrizität mit allen in Verbindung. Ebenso leicht wie der elektrische Strom Licht- und Wärmewirkungen hervorbringt, ebenso leicht bringt er auch chemische Wirkungen hervor, Wirkungen, die sowohl für die wissenschaftliche Untersuchung der Elektrizität, als für die praktische Benutzung derselben von der größten Wichtigkeit geworden sind.

Die Leiter des elektrischen Stromes sind, wie wir wissen, von zweierlei Art, Leiter erster und zweiter Klasse. Zu der ersten Klasse gehören alle Metalle, Kohle, Selen und eine Reihe von anderen nicht direkt metallischen Körpern. Zu den Leitern zweiter Klasse gehören alle zusammengesetzten Flüssigkeiten, die den Strom überhaupt leiten. Wenn nun der elektrische Strom durch eine solche leitende zusammengesetzte Flüssigkeit hindurchgeht, so verursacht er immer eine chemische Zersetzung dieser Flüssigkeit, eine chemische Zersetzung, die nach ganz bestimmten Gesetzen vor sich geht. Man nennt die Leiter zweiter Klasse deshalb auch gewöhnlich Elektrolyte, weil sie durch Elektrizität zersetzt werden (von λύειν, lyein, lösen, zersetzen). Den Vorgang der Zersetzung nennt man Elektrolyse. Wir haben schon früher das Wort Elektroden oft benutzt, um die Enden der stromzuführenden Leiter zu bezeichnen. Gerade bei der Elektrolyse wurde diese Bezeichnung zuerst von Faraday eingeführt. Will man nämlich den elektrischen Strom von einer Stromquelle aus durch eine Flüssigkeit gehen lassen, so muß man in diese Flüssigkeit zwei Platten oder Drähte aus Metall eintauchen, von denen die eine Platte mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pol der Stromquelle (Batterie) in Verbindung ist. Diese Platten oder Drähte nennt man speziell die Elektroden (von ὁδός, hodos, Weg, Bahn). Zur Unterscheidung nennt man die mit dem negativen Pol (Zinkpol) der Batterie verbundene Elektrode die Kathode, die mit dem positiven Pol verbundene die Anode (das eine von κατ', kat', weg, das andere von ἀν', an', hin — also wegführende Bahn und hinführende Bahn).

Taucht man zwei Elektroden von gleichem Metall, z. B. zwei Platinelektroden, oder auch von verschiedenem Metall in eine leitende Flüssigkeit und schickt man durch sie einen elektrischen Strom, so wird die Flüssigkeit stets in ihre Bestandteile zerlegt, es findet stets eine Zersetzung der Flüssigkeit statt. Aber diese Zersetzung geht scheinbar nicht überall in der ganzen Flüssigkeit vor sich, sondern nur an den Elektroden selbst. Taucht man z. B. die beiden Platinplatten in Brunnenwasser und schickt den Strom von 2 oder 3 Bunsenelementen hindurch, so sieht

man an der positiven und an der negativen Platinplatte Gasblasen aufsteigen, und zwar an der positiven Sauerstoff, an der negativen Wasserstoff. Es ist gerade dieser Vorgang im Wasser kein einfacher, wir werden ihn daher erst nachher ausführlicher behandeln.

Leitende Flüssigkeiten sind im allgemeinen die Lösungen von Säuren, wie Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure, in Wasser und die Lösungen von Salzen in Wasser. Gerade diese Lösungen von Salzen und Säuren sind für die Elektrolyse von besonderer Wichtigkeit, und wir werden sie daher hauptsächlich besprechen. Ein jedes Salz, z. B. schwefelsaures Kupfer (Kupfervitriol), enthält als einen Bestandteil ein Metall, hier Kupfer, der andere Bestandteil ist eine Säure oder Sauerstoff oder Chlor u. dergl., hier ist er Schwefelsäure. Läßt man nun eine Salzlösung elektrolysieren, *so scheidet sich immer das Metall an der negativen Elektrode ab*, der Rest des Salzes erscheint an der positiven Elektrode. Also in unserem Beispiel, wenn man eine Lösung von Kupfervitriol zersetzt, tritt das reine metallische Kupfer an der negativen Elektrode auf, bei Zinkvitriol scheidet sich das Zink, bei salpetersaurem Silber das Silber, bei Goldchlorid das Gold, bei Chlornatrium (Kochsalz) das Natrium an der negativen Elektrode ab. Man erkennt schon daraus die Wichtigkeit dieser Wirkung des elektrischen Stromes; denn es ist ja dadurch möglich, Metalle aus ihren Salzen in reinem Zustand auszuscheiden, ein Prozeß, der auf andere Weise nur durch große Hilfsmittel, wenn überhaupt, durchzuführen ist. Der andere Bestandteil des Salzes scheidet sich also an der positiven Elektrode ab. Man nennt die beiden Bestandteile eines Elektrolyten, in welche er durch den Strom zerlegt wird, seine *Ionen* (von ἰόν, i-on, das Wandernde) und bezeichnet auch nach Faradays Vorgang den an der positiven Elektrode (Anode) auftretenden Bestandteil als *Anion*, den an der negativen (Kathode) auftretenden als *Kation*. Wir haben daher den ersten Satz:

Bei jeder elektrolytischen Zersetzung scheidet sich das Metall an der Kathode ab.

Zu den Metallen gehört in diesem Satze auch der *Wasserstoff*, z. B. in der Schwefelsäure SO_4H_2 ist Wasserstoff H_2 das Kation und der Rest SO_4 das Anion.

Dieser allgemein gültige Satz, daß das Anion eines Elektrolyten an der Anode, das Kation an der Kathode frei auftritt, wird jedoch häufig verdeckt, so daß er scheinbar nicht richtig ist.

Es ist nämlich von vornherein einzusehen, daß wenn eine Flüssigkeit in ihre Bestandteile zerlegt wird, diese Bestandteile unter Umständen wieder rein chemisch auf die Flüssigkeit oder auf die Elektroden wirken können. Män erhält deshalb sehr häufig bei der Elektrolyse nicht die wirklichen Produkte der Zersetzung, sondern diejenigen Produkte, die durch die rein chemische Einwirkung der Ionen auf die Flüssigkeit oder die Elektroden entstehen. Die elektrolytisch abgeschiedenen Bestandteile gehen, wie man sagt, *sekundäre Prozesse* ein. Schickt man z. B. den Strom zwischen Platinelektroden durch eine Lösung von Chlornatrium (Kochsalz) in Wasser, so sollte an der positiven Elektrode freies Chlor, an der negativen Natrium entstehen. Das Natrium aber wirkt im *Moment* seines Entstehens sofort auf das Wasser zersetzend und bildet

Ätznatron und Wasserstoff, während das freie Chlor sich sofort mit der Platinelektrode zu Platinchlorid verbindet; man sieht also deshalb weder Natrium noch Chlor auftreten.

Namentlich der positive Bestandteil, das Anion, welches gewöhnlich eine Säure oder Chlor oder ein anderer sehr reaktionsfähiger Stoff ist, tritt fast immer in chemische Verbindung mit dem Elektrodenmetall oder mit der Flüssigkeit. Wenn z. B. Zinkvitriol zwischen Kupferelektroden elektrolysiert wird, so tritt an der negativen Elektrode Zink auf, an der positiven Elektrode verbindet sich der entstehende Schwefelsäurerest sofort mit dem Kupfer der Elektrode zu schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol) und es bildet sich also an der positiven Elektrode Kupfervitriol durch einen sekundären Prozeß. Ein anderes Beispiel: Wenn man eine konzentrierte Lösung von Zinnchlorür ($SnCl_2$) zersetzt, so entsteht an der negativen Elektrode Zinn, an der positiven würde freies Chlor auftreten. Dieses wirkt aber sofort auf das gelöste Salz selbst, auf das Zinnchlorür, und verwandelt dieses in Zinnchlorid, so daß an der positiven Elektrode kein freies Chlor auftritt, sondern Zinnchlorid.

Es kann also der an der positiven Elektrode abgeschiedene Bestandteil eine große Menge von sekundären Prozessen eingehen.

Ebenso kann aber auch das Metall, das an der negativen Elektrode auftritt, sofort wieder in chemische Verbindung mit den anderen vorhandenen Stoffen treten, wenn es überhaupt eine energische chemische Aktionsfähigkeit hat.

So sind namentlich die Alkalimetalle, Kalium und Natrium, chemisch sehr wirksam und daher treten bei ihnen immer sekundäre Prozesse auf, sie wirken zersetzend auf das Wasser der Lösung. Läßt man z. B. eine Lösung von schwefelsaurem Natron (SO_4Na_2) zwischen Platinelektroden zersetzen, so scheidet sich an der negativen Elektrode das Metall, Natrium, ab, dieses zersetzt aber sofort das Wasser der Lösung in Hydroxyl (HO) und Wasserstoff. Das Hydroxyl verbindet sich mit dem Natrium in Wasser zu Natronlauge (NaHO), der Wasserstoff wird frei und tritt an der negativen Elektrode in Form von Blasen auf. Auch an der positiven Elektrode treten hierbei sekundäre Prozesse auf. Das dort sich abscheidende Anion SO_4 zerfällt in $SO_3 + O$, und der Bestandteil SO_3 bildet mit dem Wasser (H_2O) sofort Schwefelsäure SO_4H_2, während der Sauerstoff frei wird und in Form von Blasen an der positiven Elektrode auftritt. Es sollte sich also bei der Elektrolyse von schwefelsaurem Natrium (SO_4Na_2) an der negativen Elektrode Natrium, an der positiven SO_4 bilden. In Wirklichkeit bildet sich aber durch sekundäre Prozesse an der negativen Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff. Gerade solche sekundäre Prozesse waren es, welche bei der ersten Entdeckung der Elektrolyse einen großen Irrtum erzeugten. Leitet man nämlich einen elektrischen Strom mittels Platinplatten durch ein Gefäß mit gewöhnlichem Wasser, so entwickelt sich an der negativen Elektrode immer Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff. Man glaubte deshalb natürlich zuerst, daß das Wasser durch den Strom direkt in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt würde. Spätere Untersuchungen haben aber gezeigt, daß das nicht der Fall ist. Ganz reines Wasser, welches von allen Spuren von aufgelösten Salzen befreit ist, leitet den elektrischen Strom nicht, ist ein fast vollkom-

mener Isolator, kann also auch nicht elektrolysiert werden. Wenn das Wasser einigermaßen gut leitet, wie es bei den erwähnten Versuchen über Elektrolyse des Wassers der Fall war, so enthält es immer eine Reihe von Salzen in mehr oder minder großen Quantitäten aufgelöst, namentlich von Natron- und Kalisalzen. Durch den Strom werden nun diese Salze zersetzt und die Metalle an der negativen Elektrode zersetzen das Wasser, verbinden sich mit dem Sauerstoff und lassen den Wasserstoff frei werden und sich entwickeln. Der Rest der Salze verbindet sich an der positiven Elektrode mit dem Wasserstoff des Wassers und läßt Sauerstoff frei werden. So treten bei dem Durchgang des Stromes durch Wasser allerdings Wasserstoff und Sauerstoff auf, aber nicht durch direkte Elektrolyse, sondern durch sekundäre Prozesse. Dasselbe geschieht, wenn man Wasser mit irgend einer Säure, z. B. Schwefelsäure, ein wenig ansäuert. Dann wird von der Schwefelsäure (SO_4H_2) an der negativen Elektrode Wasserstoff frei, an der positiven Elektrode zerfällt der Rest SO_4 in $SO_3 + O$ und der Sauerstoff tritt frei auf. Oder wenn man Salzsäure ClH dem Wasser zusetzt, so wird das Kation H frei, und das Anion Chlor Cl verbindet sich mit dem Wasserstoff des Wassers zu ClH und der Sauerstoff des Wassers tritt auch hier durch sekundäre Prozesse frei auf.

Woher kommt es nun aber, daß bei der Elektrolyse die freien Bestandteile immer nur an den Elektroden auftreten? Wenn der Strom auf die Flüssigkeit zersetzend wirkt, so muß er doch das in der ganzen Ausdehnung der Flüssigkeit tun, durch welche er geht, und nicht bloß an den Elektroden, an den Eintritts- und Austrittsstellen? Die Erklärung für diese Erscheinungen bietet die Theorie der Lösungen von Clausius-Arrhenius, welche mit allen aus ihr gezogenen Folgerungen bisher ausnahmslos bestätigt worden ist. Nach dieser Theorie besteht jedes zusammengesetzte Molekül, z. B. Chlornatrium NaCl, aus zwei Bestandteilen, die von vornherein schon und dauernd elektrisch, aber entgegengesetzt elektrisch sind, dem positiven Metall und dem negativen Rest. Das Molekül ist daher unelektrisch. Wenn ein solches Salz in Wasser aufgelöst wird, so darf man aber nicht annehmen, daß in dem Wasser lauter Chlornatrium-(Kochsalz-)Moleküle selbst schwimmen. Vielmehr bringt der Vorgang der Lösung eine weitgehende Dissoziation dieser Moleküle hervor. Die einzelnen Kochsalzmoleküle sind in der Lösung in ihre Atome geteilt, und zwar kann man sich den Grund dieser Dissoziation so vorstellen, daß jedes Molekül in der Flüssigkeit sich rasch und heftig bewegt, dabei an andere Moleküle anstößt und dadurch in seine Bestandteile zertrümmert wird. Diese Atome, die also starke elektrische Ladungen besitzen, sind die Ionen des Moleküls. Es gehen also in der Flüssigkeit fortwährend Trennungen und Wiedervereinigungen dieser Ionen vor sich, jedoch so, daß der Hauptteil aller Moleküle dissoziiert ist. Diese Vorstellung von der Natur einer zersetzbaren Flüssigkeit ist noch ganz unabhängig von den Erscheinungen der Elektrolyse. Wenn nun in eine solche dissoziierte Flüssigkeit zwei Elektrodenplatten hineingestellt werden, von denen die eine positiv elektrisch, die andere negativ elektrisch ist, so wirken die Elektrizitäten dieser Platten anziehend und abstoßend auf die elektrischen Ladungen der Ionen. *Die negative* Elektrode zieht die positiv geladenen Metallionen an, die

positive Elektrode den negativen Rest. Im Inneren der Flüssigkeit findet also eine fortschreitende Bewegung, eine Wanderung aller Kationen nach der einen, aller Anionen nach der anderen Richtung statt. Bei dieser Wanderung sind jedoch im Inneren der Flüssigkeit überall dieselbe Zahl von positiven und negativen Ionen vorhanden. Das Innere der Flüssigkeit bleibt also scheinbar unverändert.

Anders ist es an der Grenze, an den Elektrodenplatten selbst. Dort kommen immerfort an die negative Elektrode positive Metallionen heran. Diese geben nun ihre Ladung an die Elektrode ab und bleiben unelektrisch an ihr haften. Ebenso werden die Anionen an der positiven Elektrode unelektrisch und bleiben an ihr, resp. wenn sie gasförmig sind, gehen sie an ihr in die Luft.

Nach dieser Theorie ist es also nicht der Strom, welcher die Moleküle zersetzt. Vielmehr sind die Moleküle schon zum größten Teil zersetzt und der Strom bringt nur eine bestimmte Bewegung dieser Teilmoleküle, Ionen, hervor.

Obwohl diese Theorie auf den ersten Anblick etwas künstlich erscheint, schließt sie sich doch mit merkwürdiger Präzision allen, selbst den feinsten Erscheinungen, die bei der Untersuchung von zusammengesetzten Flüssigkeiten auftreten, an und hat sich daher allgemeine Anerkennung erworben.

Die genauere quantitative Untersuchung der elektrolytischen Erscheinungen hat sich nun offenbar mit einer Reihe von Fragen zu beschäftigen, von denen die erste folgende ist: Wenn eine bestimmte Verbindung, z. B. Chlorsilber, durch den Strom zersetzt wird, wieviel Chlor und wieviel Silber tritt dann gleichzeitig an den Elektroden auf?

Diese Frage beantwortet sich folgendermaßen: Es ist bekannt, daß die Chemie für jeden Stoff eine gewisse Zahl, das Atomgewicht, gefunden hat, welche in Verbindung mit der chemischen Formel einer Verbindung sofort anzeigt, wieviel Gewichtsteile von jedem der konstituierenden Stoffe in einer Verbindung vorhanden sind.

Wenn z. B. die Chemie für Chlor (Cl) das Atomgewicht 35,5 und für Silber (Ag) das Atomgewicht 108 angibt, und wenn sie die Formel für Chlorsilber AgCl schreibt, so heißt das: 1 Atom, also 35,5 Gewichtsteile (g, cg, mg u. s. w.) Chlor verbinden sich mit 1 Atom, also 108 Gewichtsteilen (g, cg, mg u. s. w.) Silber zu 143,5 Gewichtsteilen Chlorsilber.

Oder wenn Schwefel (S) das Atomgewicht 32, Sauerstoff (O) das Atomgewicht 16, Kupfer (Cu) das Atomgewicht 63,5 hat, und wenn die Formel für Kupfervitriol geschrieben wird

$$SO_4Cu,$$

so heißt das, daß 32 Gewichtsteile Schwefel mit 64 Gewichtsteilen Sauerstoff und 63,5 Gewichtsteilen Kupfer sich zu 159,5 Gewichtsteilen Kupfervitriol verbinden.

Bei jeder elektrolytischen Zersetzung treten nun an den Elektroden die Bestandteile gerade in dem Gewichtsverhältnis auf, in dem sie in der zersetzten Verbindung stehen. Wird z. B. Chlorsilber

elektrolysiert, so treten an der negativen Elektrode immer 108 Gewichtsteile Silber auf, wenn an der positiven 35,5 Gewichtsteile Chlor entstehen; wird Kupfervitriol elektrolysiert, so entstehen an der negativen Elektrode 63,5 Gewichtsteile Kupfer, während an der positiven 96 Gewichtsteile SO_4 auftreten. Oder wenn Zinkchlorid elektrolysiert wird, dessen Formel ist $ZnCl_2$, so treten, da das Atomgewicht des Zinks 65,2, das des Chlors 35,5 ist, an der negativen Elektrode immer 65,2 Gewichtsteile Zink auf, während an der positiven 71 Gewichtsteile Chlor entstehen.

Man erkennt also, daß jede Substanz molekülweise zersetzt wird, d. h. die Gewichtsmengen der abgeschiedenen Ionen stehen in demselben Verhältnis, in dem sie in dem Molekül stehen. Die Gewichtsmengen der Bestandteile in einer Substanz nennt man aber ihre chemischen Äquivalentgewichte. Es folgt also daraus der Satz:

In einer bestimmten Flüssigkeit stehen die Mengen der abgeschiedenen Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte.

Die chemischen Äquivalentgewichte sind bestimmte Zahlen, welche alle auf Wasserstoff bezogen sind, sie sind nämlich für die Elemente gleich den Atomgewichten, dividiert durch die Wertigkeit. Das Äquivalentgewicht des Wasserstoffs wird gleich 1 gesetzt.

Gehen nun die abgeschiedenen Ionen sekundäre chemische Prozesse mit den Elektroden oder der Flüssigkeit ein, so verbindet sich nach den Gesetzen der Chemie auch wieder jedes von den Ionen immer mit so viel Gewichtsteilen der Elektrode oder der Flüssigkeit, als ihm chemisch äquivalent wird.

Wenn also z. B. schwefelsaures Natron Na_2SO_4 durch den Strom zerlegt wird, so daß an der negativen Elektrode Na_2, d. h. 2×23 Gewichtsteile Natrium entstehen, so zersetzt dieses Natrium die ihm äquivalente Menge von Wasser, bildet 2(NaOH) und scheidet aus dem Wasser H_2 ab, also gerade so viel Wasserstoff, als dem abgeschiedenen Natrium chemisch äquivalent ist.

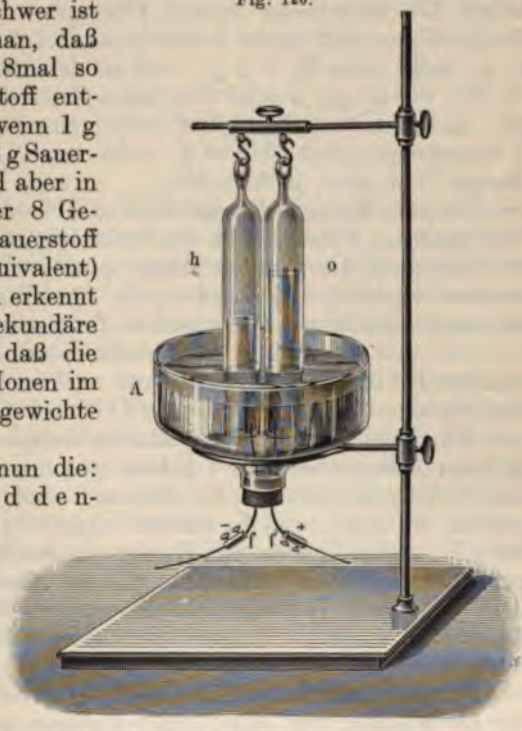
Mit anderen Worten: Wenn Elektrolyse stattfindet, so treten entweder die Bestandteile des Elektrolyten selbst oder die durch chemische Umsetzung erzeugten sekundären Produkte immer in chemisch äquivalenten Mengen auf.

Man kann dies bei der Zersetzung von Wasser, welche ja durch sekundäre Prozesse vor sich geht und in Wirklichkeit die Zersetzung von sehr verdünnten Lösungen ist, leicht experimentell zeigen. Aus etwas angesäuertem Wasser erhält man, wie erwähnt, durch die Elektrolyse Wasserstoff und Sauerstoff, die beiden Bestandteile des Wassers. Man kann diese beiden Gase, wenn sie sich entwickeln, getrennt auffangen, wenn man jede Elektrode einzeln in ein oben geschlossenes, mit Wasser gefülltes Gefäß bringt. Einen solchen Apparat zeigt Fig. 120. Die beiden Glasröhren o und h werden mit Wasser gefüllt und tauchen in die Schüssel A ein, welche ebenfalls mit Wasser gefüllt ist, so daß das Wasser in den beiden Röhren durch das in A befindliche Wasser in Verbindung steht. In jede der beiden Röhren taucht nun eine Elektrode von Platin ein, welche *durch* einen Kork, der die Schüssel A unten verschließt, hindurchgesteckt

ist. Bei f und f' sind Klemmschrauben, in welche die Drähte vom Element eingeklemmt werden. Sowie nun der Strom in die Elektroden kommt und durch das Wasser hindurchgeht, entwickelt sich an der einen Elektrode (in h) Wasserstoff, an der anderen (in o) Sauerstoff. Diese Gase steigen in den Röhren in die Höhe und drücken das Wasser allmählich aus diesen heraus.

Wenn man diesen Versuch anstellt, so sieht man sofort, daß von dem Wasserstoff in derselben Zeit doppelt so viel (dem Volumen nach) aufsteigt als vom Sauerstoff. Die Röhre o ist nur immer halb so weit mit Gas gefüllt als die Röhre h. Da nun Sauerstoff 16mal so schwer ist als Wasserstoff, so sieht man, daß dem Gewicht nach immer 8mal so viel Sauerstoff wie Wasserstoff entwickelt wird, oder immer, wenn 1 g Wasserstoff auftritt, treten 8 g Sauerstoff zugleich auf. Nun sind aber in einem Wassermolekül immer 8 Gewichtsteile (1 Äquivalent) Sauerstoff mit einem Gewichtsteil (Äquivalent) Wasserstoff verbunden. Man erkennt also, daß das Wasser durch sekundäre Prozesse so zersetzt wird, daß die Gewichte der auftretenden Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen.

Fig. 120.



Die zweite Frage ist nun die: Wenn man einen und denselben Strom der Reihe nach durch verschiedene zersetzbare Flüssigkeiten gehen läßt, in welchem Verhältnis stehen dann die in jeder von diesen Flüssigkeiten zersetzten Mengen zueinander?

Die Antwort auf diese Frage hat Faraday durch eine große Reihe von Versuchen gegeben. Diese Antwort lautet: Durch denselben Strom werden in allen elektrolysierten Flüssigkeiten in derselben Zeit die Bestandteile in demjenigen Mengenverhältnis abgeschieden, welches gleich dem Verhältnis ihrer chemischen Äquivalentgewichte ist.

In der Chemie bezeichnet man als Grammäquivalent einer Substanz diejenige Anzahl Gramme der Substanz, welche gleich dem Äquivalentgewicht ist. Also 1 Grammäquivalent Natrium sind 23 Gramm Na, 1 Grammäquivalent Silber sind 107,7 Gramm Ag, 1 Grammäquivalent Sauerstoff sind 8 Gramm O u. s. w.

Ein Beispiel wird das Faradaysche Gesetz klarmachen. Wenn man einen und denselben Strom der Reihe nach durch drei Gefäße mit Flüssigkeiten leitet, so daß er zu gleicher Zeit in den drei Gefäßen (die man Zersetzungszellen nennt) die Flüssigkeiten elektrolysiert, so müssen die abgeschiedenen Mengen der Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen. Sind diese drei Flüssigkeiten z. B. eine Lösung von Kochsalz (ClNa), eine Lösung von Schwefelsäure (SO_4H_2) und eine Lösung von Zinnchlorür ($SnCl_2$), so wird in der ersten Flüssigkeit in bestimmter Zeit etwa 1 Grammäquivalent Na (23 g) an der negativen und 1 Grammäquivalent Cl (35,5 g) an der positiven Elektrode abgeschieden. In derselben Zeit muß in der zweiten Flüssigkeit die dem Natrium äquivalente Menge Wasserstoff an der Kathode entwickelt werden, also 1 Äquivalent H (1 g, nicht etwa $H_2 = 2$ g), und an der Anode entsteht also die Menge $^1/_2$ SO_4 (= 48 g), welche dem einen Äquivalent Wasserstoff gleichwertig ist. In der dritten Flüssigkeit endlich entsteht an der positiven Elektrode 1 Grammäquivalent Cl (35,5 g, nicht etwa $Cl_2 = 71$ g) und die äquivalente Menge Zinn, also $^1/_2$ Sn = 59 g.

Da die Mengen der an jeder Elektrode abgeschiedenen Ionen bei verschiedenen Flüssigkeiten im Verhältnis der Äquivalentgewichte stehen, so steht auch die gesamte Menge der durch Elektrolyse zersetzten Substanzen in allen Flüssigkeiten im Verhältnis der Äquivalentgewichte, es nimmt also in einer bestimmten Zeit, während welcher die Elektrolyse vor sich geht, die Menge des Chlornatriums ab um $35{,}5 + 23 = 58{,}5$ Gewichtsteile, die der Schwefelsäure um $^1/_2$ $(96 + 2) = 49$ Gewichtsteile und die des Zinnchlorürs um $^1/_2$ $(118 + 71) = 94{,}5$ Gewichtsteile.

Ein Strom ferner, um ein anderes Beispiel zu nehmen, der aus Wasser in einer bestimmten Zeit 1 g Knallgas entwickelt, scheidet in derselben Zeit 3,522 g Kupfer aus Kupfervitriol und 11,99 g Silber aus salpetersaurem Silber ab, weil die Zahlen 1 : 3,522 : 11,99 sich wie die Äquivalentzahlen des Knallgases, des Kupfers in Kupfervitriol, des Silbers in salpetersaurem Silber verhalten. Es ist nämlich das Äquivalentgewicht des Knallgases $^1/_2$ $(H_2 + O) = 9$, das des Kupfers $^1/_2$ $Cu = 31{,}75$, das des Silbers $Ag = 107{,}7$, und diese stehen gerade in dem oben angegebenen Verhältnis.

Diese gesetzmäßigen Beziehungen werden uns sofort neue Mittel für die Messung von elektrischen Strömen gewähren.

Die dritte wichtige Frage ist nun die: Von welchen Verhältnissen des elektrischen Stromes hängt die Menge der abgeschiedenen Substanzen ab? Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Menge der abgeschiedenen Ionen erstens abhängt von der Dauer des Stromes, nämlich um so mehr wächst, je länger man den Strom hindurchgehen läßt. Zweitens aber hängt die Menge der in jeder Sekunde elektrolytisch abgeschiedenen Stoffe bei jedem bestimmten Elektrolyten allein ab von der Stromstärke. Dies läßt sich durch Versuche leicht nachweisen.

Wenn man eine Stromverzweigung macht, wie in Fig. 121, und sowohl in den Hauptzweig 1 wie auch in jeden der Zweige 2 und 3 je eine Zersetzungszelle V_1, V_2, V_3 einschaltet, z. B. je einen Platintiegel mit

einer Lösung von salpetersaurem Silber, und wenn man ferner noch in die Zweige 2 und 3 beliebige Widerstände W_2 und W_3 einschaltet, so ist ja in jedem der drei Zweige die Stromstärke verschieden und es zeigt sich, daß auch in jeder der drei Zersetzungszellen verschiedene Mengen Silber sich auf der Kathode niederschlagen. Die Stromstärke in 1 ist nun gleich der Summe der Stromstärken in 2 und 3 und man findet auch, daß die Silbermenge, die sich in der Zersetzungszelle V_1 niedergeschlagen hat, gleich der Summe der in V_2 und V_3 erhaltenen Silbermengen ist. Ferner verhalten sich die Stromstärken in 2 und 3 umgekehrt wie die Widerstände dieser Zweige (S. 69) und ebenso findet man auch das Verhältnis der Silbermengen in V_2 und V_3. Man kann diesen Versuch auf verschiedene Weise variieren, immer aber findet man dasselbe Resultat, daß die Menge einer elektrolytisch abgeschiedenen Substanz nur abhängt erstens von der Dauer des Stromdurchgangs und zweitens von der Intensität des Stromes.

Fig. 121.

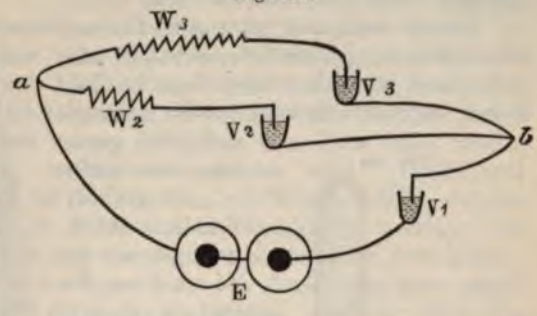


Fig. 122.

Man kann den Versuch bequem auch in folgender Form machen. Man schaltet in einen Stromkreis, der etwa drei Bunsenelemente enthält, erstens ein Amperemeter (etwa das von S. 77) und zweitens ein Gefäß mit angesäuertem Wasser ein, in welches Platinplatten als Elektroden tauchen. Fig. 122 zeigt eine zweckmäßige Form eines solchen Gefäßes. Es sind darin c und d die Zuleitungsdrähte, welche zu den Platinplatten führen. Durch den Strom entwickelt sich nun an der einen Elektrode Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff, und diese Gase entweichen zusammen durch das gekrümmte Rohr b, welches in den Verschlußkork A des Gefäßes luftdicht eingesteckt ist. Um dieses entweichende Gasgemisch, welches bekanntlich Knallgas heißt, aufzufangen, führt das gekrümmte Rohr in eine mit Wasser gefüllte, geteilte Röhre, welche in einer mit Wasser gefüllten Schüssel steht, wie Fig. 123 zeigt. Die Gase steigen aus dem gekrümmten Rohr in die geteilte Röhre und treiben das Wasser aus dieser Röhre hinaus. Die Röhre ist so geteilt, daß der Rauminhalt zwischen je zwei Teilstrichen gleich 1 ccm ist. Man kann also auf ihr sofort ablesen, wie viel Kubikzentimeter Knallgas in der bestimmten Zeit, während welcher man den Strom hat durchgehen

lassen, aus dem Zersetzungsapparat entwickelt wurden. Macht man nun diesen Versuch, so findet man bei diesem Strom von drei Bunsenschen Elementen erstens an dem Amperemeter eine bestimmte Zahl von Ampere und zweitens ein bestimmtes Volumen von abgeschiedenem Knallgas, wenn man den Strom z. B. 10 Minuten hat durchgehen lassen und ihn dann unterbrochen hat.

Nimmt man aber jetzt statt dreier Bunsenschen Elemente z. B. zehn hintereinander geschaltete, schaltet aber außerdem noch so viel Drahtwiderstand ein, bis wieder dieselbe Zahl von Ampere vorhanden ist wie früher, und schließt man den Strom wieder 10 Minuten lang, so findet man, daß jetzt genau ebensoviel Knallgas entwickelt wird wie vorher.

Fig. 123.

Je größer die Stromstärke ist, desto mehr Knallgas wird in 1 Minute ausgeschieden, je geringer sie ist, um so weniger. Diese Beziehung kann man auch, und das ist von großer Wichtigkeit, umgekehrt benutzen. Je mehr Knallgas durch einen Strom in bestimmter Zeit entwickelt wird, desto größer ist die Stärke des Stromes, je weniger entwickelt wird, desto kleiner. Man kann also direkt die abgeschiedene Menge Knallgas als Maß der Stromstärke benutzen. Werden durch einen Strom z. B. in der Minute 5 ccm Knallgas entwickelt, durch einen anderen 10 ccm in der Minute, so beweist uns dies, daß die Stärke des Stromes im zweiten Falle doppelt so groß ist als im ersten Falle.

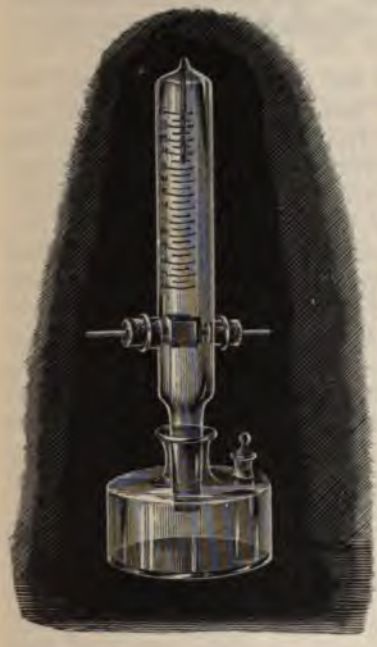
Man nennt die Apparate, welche durch Elektrolyse die Stärke eines Stromes zu messen gestatten, Voltameter (nicht zu verwechseln mit Voltmeter o. S. 101). Den in Fig. 122 und 123 abgebildeten Apparat kann man direkt zur Messung der Stromstärke benutzen, indem die entwickelte Menge Knallgas direkt ein Maß für die Intensität des Stromes ist. Man nennt ihn ein Knallgasvoltameter.

Ein Strom von einer bestimmten Stärke scheidet in jedem Knallgasvoltameter in gleicher Zeit immer die gleiche Menge Knallgas ab.

Man braucht also nur ein für allemal zu bestimmen, wie viel Knallgas unsere Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, in 1 Sekunde aus einem Knallgasvoltameter entwickelt, um dann durch eine solche voltametrische Messung jederzeit die Stärke eines beliebigen Stromes in Ampere angeben zu können. Ein Ampere entwickelt nun, wie exakte Versuche lehren, in 1 Sekunde 0,09328 mg Knallgas oder, da das Knallgas als Gas leichter dem Volumen nach gemessen wird, 0,1740 ccm Knallgas bei normalem Druck und normaler Temperatur. In 1 Minute werden also 10,440 ccm Knallgas entwickelt. Man kann danach stets die Stärke eines Stromes in Ampere bestimmen, *wenn* man nur den Strom zugleich durch ein Knallgasvoltameter gehen

läßt und die von dem Strome in 1 Minute abgeschiedene Menge Knallgas (dem Gewichte oder dem Volumen nach) mißt und durch die obige Zahl dividiert.

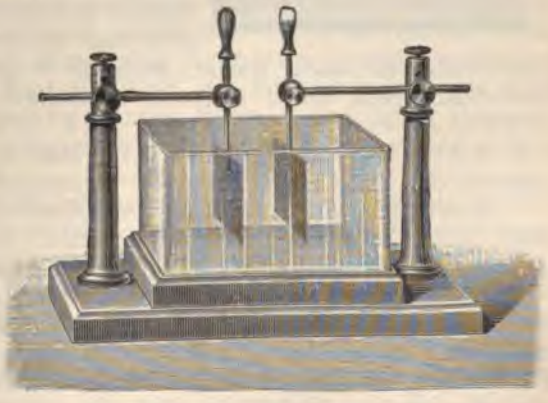
Fig. 124.



In eine handliche Form hat F. Kohlrausch das Knallgasvoltameter (Wasservoltameter von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M.) gebracht. Dasselbe besteht, wie Fig. 124 zeigt, aus einem in Kubikzentimeter geteilten weiten Rohr, welches durch einen Schliff in den Hals eines weiten Gefäßes eingesetzt wird. Gefäß und Rohr werden mit Wasser gefüllt, welches etwas mit Schwefelsäure versetzt ist. In dem Rohr befinden sich zwei Platinelektroden, von denen die eine gabelförmig die andere umfaßt. Die Zuleitungsdrähte gehen durch Kautschukstopfen nach außen. Das entwickelte Knallgas treibt das Wasser aus dem geteilten Rohr heraus und sein Volumen wird dann direkt an der Röhre abgelesen, seine Temperatur an dem in der Röhre befindlichen Thermometer.

Statt aus der Menge des abgeschiedenen Knallgases kann man ebensogut aus der Menge irgend einer anderen elektrolytisch abgeschiedenen Substanz die Stromstärke bestimmen. Praktisch im Gebrauch sind außer dem Knallgasvoltameter noch das Kupfervoltameter und das Silbervoltameter.

Fig. 125.



Beim Kupfervoltameter (Fig. 125) tauchen zwei Platinplatten in eine (gesättigte) Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol). Läßt man den Strom hindurchgehen, dann scheidet sich auf der negativen Platinelektrode Kupfer ab und aus der Menge des abgeschiedenen Kupfers, die man durch Wägung der negativen Elektrode (getrocknet) vor und nach dem Stromdurchgang ermittelt, und aus der Dauer des Stromdurchgangs kann man sofort die Stärke des Stromes in Ampere bestimmen. Der

Strom 1 Ampere scheidet in 1 Minute 19,69 mg Kupfer ab. Um bei dem Kupfervoltameter genaue Resultate zu bekommen, muß man die Kupfervitriollösung ganz konzentriert nehmen und die beiden Elektroden möglichst groß machen. Man nimmt am besten für jedes Ampere Stromstärke die wirksame Oberfläche jeder Elektrode zu 40 Quadratzentimeter.

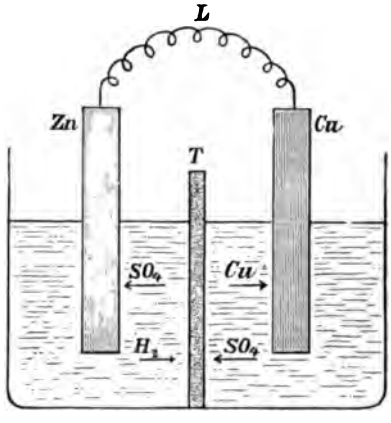
Für das Silbervoltameter, bei welchem eine Lösung von salpetersaurem Silber angewendet wird, benutzt man gewöhnlich eine Form, welche in Fig. 126 abgebildet ist. Die Lösung von salpetersaurem Silber befindet sich in einem Tiegel A von Platin, welcher auf einem metallischen Boden steht, der eine Klemmschraube b zum Zuleiten des Stromes hat. Dieser Platintiegel dient nämlich gleich als negative Elektrode, an der sich also das elektrolytisch abgeschiedene Silber ansetzt. Als positive Elektrode wird ein kleines Stäbchen von Silber in die Lösung eingetaucht. Bei der Elektrolyse der Lösung scheidet sich also Silber an dem Platintiegel ab, der Rest des Salzes, die Salpetersäure, scheidet sich an der positiven Elektrode, dem Silber, ab und verbindet sich mit diesem gleich wieder zu salpetersaurem Silber, welches sich in der Flüssigkeit auflöst. Man hat dadurch den Vorteil, daß die Lösung immer gleichmäßig konzentriert bleibt. Denn gerade so viel Silber, wie sich an den Platintiegel ansetzt, wird nach dem Faradayschen Gesetz von dem Silberstab aufgelöst. Hat man nun den Platintiegel vor dem Versuch trocken gewogen und wägt man ihn, nachdem man den Strom z. B. 1 Minute lang hat durchgehen lassen, wieder, nachdem er getrocknet ist, so gibt die Gewichtsdifferenz die in 1 Minute abgeschiedene Menge Silber. Nun scheidet ein Strom von der Stärke 1 Ampere in 1 Minute 67,10 mg Silber ab. Man hat also aus der Gewichtsdifferenz des Platintiegels sofort die Stromstärke in Ampere.

Fig. 126.

Immer, wenn ein elektrischer Strom durch eine zersetzbare Flüssigkeit fließt, findet Zersetzung, Elektrolyse, statt. Daraus folgt, daß auch in einem geschlossenen galvanischen Element selbst, das ja auch von seinem eigenen Strom durchflossen wird, elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeiten eintreten muß, und daß diese Zersetzung auch genau nach dem Faradayschen Gesetz vor sich gehen muß. Und das ist in der Tat der Fall. Wird z. B. ein Daniellsches Element geschlossen, so daß es von einem Strom durchflossen wird, so werden die beiden Flüssigkeiten zersetzt. In Fig. 127 steht als Schema eines Daniellschen Elementes ein Zinkstab (Zn) in Schwefelsäure (SO_4H_2) und ein Kupferstab Cu in Kupfer*vitriol* ($CuSO_4$). Die beiden Flüssigkeiten sind durch eine Tonplatte T

getrennt. Das Kupfervitriol wird zerlegt in Kupfer (Cu) und SO_4, welches nicht frei bestehen kann. Die verdünnte Schwefelsäure wird zerlegt in Wasserstoff (H_2) und SO_4. In dem Element selbst ist nun Kupfer die negative Elektrode, denn der positive Strom fließt ja innerhalb des Elementes vom Zink zum Kupfer. Es wandern infolgedessen Cu und H_2 nach rechts, zum Kupfer hin, die beiden SO_4 nach links, zum Zink hin. Zunächst tritt daher das aus dem Kupfervitriol abgeschiedene Kupfer an die Kupferelektrode heran und diese bedeckt sich während der Dauer des Stromes mit einer glänzenden Schicht von reinem metallischen Kupfer. Dem SO_4 aus dem Kupfervitriol aber kommt von der elektrolysierten Schwefelsäure freier Wasserstoff H_2 entgegen und diese beiden Komponenten verbinden sich wieder zu Schwefelsäure H_2SO_4. Der andere Bestandteil der elektrolysierten Schwefelsäure, SO_4, geht zum Zink, welches in dem Element ja positive Elektrode ist, und verbindet sich mit diesem sofort zu schwefelsaurem Zink (Zinkvitriol SO_4Zn). Alle diese Trennungen und Vereinigungen gehen nach dem Faradayschen Gesetz in äquivalenten Mengen vor sich. Das Resultat dieser chemischen Vorgänge in der Kette ist also das, daß fortwährend Zink sich in Zinkvitriol umwandelt und zu gleicher Zeit eine äquivalente Menge Kupfer sich an der Kupferelektrode niederschlägt. Aber man sieht, daß sich bei diesem Prozeß auch die Flüssigkeiten selbst fortwährend ändern müssen, daß sie nicht immer dieselbe Zusammensetzung behalten. Denn aus der Kupfervitriollösung wird ja fortwährend Kupfer ausgeschieden und dafür Schwefelsäure frisch gebildet. Diese Lösung wird also immer verdünnter an Kupfervitriol, wenn man nicht dafür sorgt, daß immer neue Kupfervitriolkristalle vorhanden sind, die sich auflösen können. Und die Flüssigkeit um das Zink herum, die zunächst aus verdünnter Schwefelsäure allein bestand, reichert sich allmählich immer mehr mit Zinksulfat an, verändert sich also auch.

Fig. 127.



Wenn sich Zink in Schwefelsäure auflöst (Zinksulfat bildet), so entsteht, wie die Thermochemie lehrt, immer eine gewisse Wärmemenge, bei dem Ausfällen von Kupfer aus Kupfervitriol wird dagegen eine andere, und zwar viel kleinere Wärmemenge verbraucht. Die chemischen Vorgänge in der Kette lassen also eine gewisse Wärmemenge frei werden. Diese Wärmemenge nun bleibt nicht frei im Element, sie dient nicht dazu, die Temperatur des Elements zu erhöhen, sondern die Energie dieser Wärmemenge verwandelt sich eben (wenigstens zum Teil) in elektrische Energie und dient dazu, den elektrischen Strom zu unterhalten. Man kann daher auch direkt sagen, wenn in einem Element ein elektrischer Strom erzeugt und unterhalten wird, so wird die Energie, die Arbeits-

menge, die der Strom enthält, geliefert auf Kosten der Wärme, welche durch die chemischen Prozesse in der Kette frei wird.

Die Vorgänge in einem Elektrolyten, wenn ein Strom durch denselben hindurchfließt, lassen sich nach den oben dargestellten Erfahrungstatsachen in sehr einfacher Weise auffassen. Immer, wenn ein Strom durch einen Elektrolyten geht, findet eine Abscheidung der Ionen an den Elektroden statt, d. h. nach der oben angeführten Theorie von Clausius-Arrhenius; es wandern dabei zugleich die positiven Ionen alle nach der Richtung der Kathode und die negativen Ionen nach der Richtung der Anode. Der Durchgang des Stromes durch einen Elektrolyten ist also stets verbunden mit einer Bewegung der körperlichen Teile des Elektrolyten, der Ionen. Diese Ionen sind aber selbst elektrisch, und zwar die Metallionen positiv, die Restionen negativ elektrisch. Es liegt daher nahe, anzunehmen, daß es nur die Bewegungen dieser Ladungen der Ionen selbst sind, welche den Strom in dem Elektrolyten bilden. Sobald die beiden Elektroden mit den Polen eines Elements in Verbindung gesetzt werden, fangen die Ionen in der Flüssigkeit an zu wandern. Die positiv elektrischen Ionen (die Metallionen) wandern nach der Kathode hin und jedes an der Kathode ankommende Ion gibt seine positive Ladung an die negativ geladene Kathode ab und wird unelektrisch und scheidet sich ab. Sofort aber kommen immer wieder neue positive Ionen an und transportieren also immer wieder neue positive Elektrizität nach der Kathode hin. Zu gleicher Zeit wandern die negativen Ionen nach der Anode hin und geben dort ihre Elektrizität ab und werden also selbst unelektrisch. Der Strom in einem Elektrolyten besteht also nach dieser Auffassung in der Wanderung der positiven Ionen nach der Kathode und der negativen Ionen nach der Anode, er ist nicht bloß mit einer solchen Doppelbewegung der geladenen Ionen verbunden, sondern er besteht in dieser Doppelbewegung.

Nun sagt aber das Faradaysche Gesetz aus, daß die Ionen in allen Flüssigkeiten immer in äquivalenten Mengen abgeschieden werden. Daher müssen sie sich auch in äquivalenten Mengen an der Stromleitung beteiligen. Das heißt mit anderen Worten: das Äquivalentgewicht eines beliebigen Ions muß dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich transportieren, wie das Äquivalentgewicht eines anderen Ions. Also wenn 1 g Wasserstoff eine gewisse Menge positiver Elektrizität (eine gewisse Anzahl Coulomb) stets mit sich führt, so müssen 23 g Natrium, 39 g Kalium, 31,6 g Kupfer, 107,7 g Silber dieselbe Anzahl Coulomb stets mit sich führen, und ebenso müssen 8 g Sauerstoff, 48 g SO_4, 62 g NO_3 dieselbe Anzahl negativer Coulomb mit sich führen. Also folgt aus dem Faradayschen Gesetz:

Die Äquivalentgewichte der verschiedenen Ionen führen alle die gleiche Anzahl Coulomb mit sich und zwar positive, wenn sie Kationen, negative, wenn sie Anionen sind.

Es sieht also so aus, als ob jedes körperliche Atom mit einer gewissen positiven oder negativen Elektrizitätsmenge fest verbunden wäre, so daß jedes Äquivalent immer dieselbe Menge Elektrizität besitzt. Diese

Folgerung erlaubt einen überraschenden Schluß auf die Natur der Elektrizität. Sie zeigt, daß ebenso wie die gewöhnliche Materie aus getrennten, diskreten Teilen, eben den Atomen, sich zusammensetzt, daß so auch die Elektrizität aus atomartigen Teilen besteht, daß die Elektrizität, und zwar sowohl die positive wie die negative Elektrizität, ein Stoff ist, welcher, wie die anderen Stoffe in der Natur, nicht kontinuierlich (zusammenhängend) ist, sondern aus getrennten (diskreten) Atomen besteht. Diese Atome der Elektrizität, die wir Elektronen nennen, haben wir schon im ersten Kapitel provisorisch angenommen, um die dort behandelten Erscheinungen zu erklären. Bei den elektrolytischen Erscheinungen finden wir nun, daß die Ladungen, also die Elektronen, immer mit der körperlichen Materie verbunden sind. Ein Ion eines Körpers werden wir danach aufzufassen haben als die (chemische) Verbindung eines Atoms des betreffenden Körpers und eines Elektrons. Ein Silberion und ein Chlorsilbermolekül sind danach Körper von derselben Konstitution. Ein Chlorsilbermolekül ist = 1 Atom Silber + 1 Atom Chlor und ein Silberion ist = 1 Atom Silber + 1 Atom positive Elektrizität. Ebenso wie die Moleküle eines Körpers gesättigte Anziehungen besitzen und daher nicht mehr chemisch reagieren, während die Atome ungesättigte Gebilde sind und starke Anziehungen ausüben, also auch stark chemisch reagieren, ebenso sind auch die Ionen gesättigte Körper, welche keine chemischen Reaktionen ausüben, sie verhalten sich, im Gegensatz zu den Atomen, wie Moleküle. Auf diese Weise kann man auch die Arrheniussche Theorie der Dissoziation von Salzen in Wasser verstehen. Wenn ein Chlornatriummolekül sich im Wasser in ein Chloratom und ein Natriumatom zerlegen würde, so müßte unbedingt das Natriumatom energisch auf das Wasser reagieren und könnte nicht unverändert im Wasser schwimmen. Aber das Chlornatriummolekül zerlegt sich eben nicht in Atome, sondern in Ionen. Die Atome Chlor und Natrium verbinden sich entweder direkt mit den Elektronen des Wassers, oder sie sind schon von selbst durch Elektronen verbunden und behalten diese bei der Dissoziation, jedenfalls sind im Wasser die Ionen und nicht die Atome vorhanden und die Ionen können als gesättigte Körper so lange bestehen, bis stärkere Anziehungskräfte sie zerreißen.

Wir können nun sogar berechnen, wieviel Coulomb mit jedem Grammäquivalent einer Substanz verbunden sind. Zu dem Zweck erinnern wir uns, daß wenn der Strom 1 Ampere während 1 Sekunde durch einen Stromkreis fließt, daß dann gerade 1 Coulomb durch den Stromkreis geht (S. 59). Nun scheidet der Strom 1 Ampere in 1 Sekunde (nach S. 140) 0,0011183 g Silber und die äquivalente Menge NO_3 (0,0006440 g) aus salpetersaurem Silber ab. Nach der obigen Darlegung besteht nun dieser Strom in dem Elektrolyten darin, daß $^1/_2$ Coulomb positiver Elektrizität mit dem Silber nach der Kathode und zugleich $^1/_2$ Coulomb negativer Elektrizität mit NO_3 nach der Anode wandert. Folglich sind unsere 0,0011183 g Silber mit $^1/_2$ Coulomb fest verbunden, also ist 1 Grammäquivalent Silber (107,7 g) verbunden mit

$$\frac{107{,}7}{2 \times 0{,}0011183} = 48270 \text{ Coulomb.}$$

Ebensoviel Coulomb führt 1 Grammäquivalent jedes anderen Ions mit sich. Wir haben also den Satz:

Ein Grammäquivalent eines jeden Ions ist mit 48 270 Coulomb (positiven oder negativen) verbunden.

Da bei der Zersetzung eines jeden Grammäquivalents einer Substanz die beiden Ionen entstehen, so gehen bei jeder elektrolytischen Zersetzung pro Grammäquivalent der zersetzten Substanz 96540 Coulomb durch die Flüssigkeit. Diese Zahl wird nach neueren Festsetzungen mit F bezeichnet.

Wenn nun in einem galvanischen Element, z. B. in einem Daniell, ein Strom fließt, so wird, wie wir gesehen haben, Zink in Schwefelsäure aufgelöst, wodurch sich Zinkvitriol bildet, und es wird Kupfer aus Kupfervitriol gefällt. Für jedes Grammäquivalent Zink, welches in Lösung geht, wird also 1 Grammäquivalent Kupfer niedergeschlagen und zugleich gehen 96 540 Coulomb durch die Lösung und den Stromkreis von der positiven Elektrode zur negativen. Die Arbeit, die die elektrischen Kräfte dabei leisten, um diese Anzahl von Coulomb von der höheren Spannung zu der niederen zu treiben, ist

elektromotorische Kraft (in Volt) $\times$ Elektrizitätsmenge (in Coulomb)
(Benennung Volt-Coulomb)

also in unserem Falle gleich

elektromotorische Kraft $\times$ 96 540 (Volt-Coulomb).

Die chemischen Prozesse sind also mit einer solchen elektrischen Arbeitsleistung verbunden. Durch die chemischen Prozesse aber wird andererseits eine gewisse Wärmemenge entwickelt. Es wird nämlich bei der Auflösung von 1 Grammäquivalent Zink in Schwefelsäure, wie die Thermochemie lehrt, eine Wärmemenge von 53 045 Einheiten (Grammkalorieen) frei, bei der Abscheidung von Kupfer aus Kupfersulfat werden dagegen pro Äquivalent 27 980 Kalorieen verbraucht. Im ganzen werden also 25 063 Kalorieen bei dem Prozeß in der Kette frei. Es ist nun nicht notwendig, daß sich diese frei werdende Wärmemenge in der Kette ganz in elektrische Energie verwandelt. Es könnte noch ein Teil der Wärme dazu verwendet werden, die Temperatur des Elements zu erhöhen. Wenn aber, was in einzelnen Fällen tatsächlich geschieht, diese thermochemische Wärmemenge sich ganz in elektrische Energie umsetzt, so können wir sofort berechnen, wie groß die elektromotorische Kraft unseres Elements (des Daniells) in Volt sein muß. Es ist nämlich (nach S. 16) 1 Volt-Coulomb $= \frac{1}{9{,}81}$ Kilogrammeter, und es ist andererseits, wie die mechanische Wärmetheorie zeigt, eine Grammkalorie gleich 0,424 Kilogrammeter. Also ist einerseits

die frei werdende Wärmemenge $= 25065 \times 0{,}424$ Kilogrammeter,

andererseits ist die geleistete elektrische Arbeit

$$= \frac{96\,540 \times \text{elektromotorische Kraft}}{9{,}81} \text{ Kilogrammeter.}$$

Da unter der ausgesprochenen Annahme diese beiden Größen einander gleich sein müssen, so ergibt sich die elektromotorische Kraft unseres Elementes

$$= \frac{25065 \times 0{,}424 \times 9{,}81}{96540} \text{ Volt} = 1{,}085 \text{ Volt}.$$

In der Tat ist die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes gerade so groß. Indes ist dieser Schluß nicht in allen Fällen richtig. Es ist ja durchaus nicht notwendig, daß die ganze Wärmemenge, die durch den chemischen Prozeß in dem Element frei wird, sich vollständig in elektrische Energie verwandle. Es kann auch ein Teil von dieser Wärme dazu benutzt werden, um die Temperatur des Elementes zu erhöhen und nur ein Teil der chemischen Wärme (der Wärmetönung) wird dann in elektrische Energie verwandelt. Das ist sogar bei den meisten Elementen der wirklich eintretende Fall. Dann ist also die zu beobachtende elektromotorische Kraft kleiner, als sie aus der Wärmetönung sich berechnen würde. Es trifft aber in manchen Fällen auch der umgekehrte Fall ein, daß die elektromotorische Kraft größer ist, als sie sich aus der Wärmetönung berechnen würde. Dann kann die nötige Energie nur dadurch geliefert werden, daß das Element selbst, während der Strom fließt, sich abkühlt, daß ihm also Wärme entzogen wird, die sich in elektrische Energie umsetzt.

Der Durchgang des galvanischen Stromes durch eine Leitung, die ein Element enthält, ist nach dem Gesagten notwendig abhängig von den chemischen Prozessen, die in dem Element auftreten. Man kann aber daraus noch immer nicht einsehen, warum überhaupt ein Strom zu stande kommt. Wenn man z. B. einen Zinkstab in gesättigter Lösung von Zinksulfat hat, so findet dabei von selbst keine nachweisbare Auflösung des Zinks statt. Und wenn man Kupfer in gesättigter Kupfersulfatlösung stehen hat, so findet dabei auch weder eine Auflösung des Kupfers noch ein Ausfällen des Kupfers aus der Lösung statt. Bringt man also einen Zinkstab in eine Tonzelle voll Zinksulfat und um diese herum Kupfersulfat mit metallischem Kupfer, so findet zunächst, wenn die Metalle nicht verbunden sind, gar kein nachweisbarer chemischer Prozeß statt, und man sieht nicht ein, woher es kommt, erstens, daß die Metalle sich dabei am Elektrometer entgegengesetzt elektrisch erweisen und zweitens, daß im Moment, wo wir die Metalle verbinden, auch ein Strom fließt und nun doch eine Auflösung des Zinks und ein Ausfällen des Kupfers vor sich geht.

Zu der Erklärung dieser Vorgänge hat sich die Theorie der Lösungen, die wir schon oben (S. 132) anführten, sehr geeignet gezeigt. Nach dieser Theorie sind also in der Lösung eines Salzes, z. B. des Kochsalzes, die aufgelösten Moleküle dissoziiert, d. h. eine große Anzahl der Moleküle sind in ihre Ionen zerfallen. Die in einem Lösungsmittel enthaltenen aufgelösten Substanzen verhalten sich nun in vieler Beziehung wie dieselben Substanzen, wenn sie in Gasform sind. So wie ein Gas jedes Volumen, das ihm dargeboten wird, vollständig ausfüllt, also sich von selbst verdünnt, wenn es nur Raum dazu hat, so verdünnt sich auch jede Lösung von selbst, wenn sie nur genügend

Lösungsmittel hat. So wie also die Gasteilchen sich selbsttätig voneinander zu entfernen suchen, in größere Abstände zu kommen suchen, so suchen auch die gelösten Teilchen von selbst sich voneinander zu entfernen, größere Zwischenräume zwischen sich zu machen. Bei den Gasen zeigt sich dieses Bestreben, auseinanderzufliegen, dadurch an, daß die Gase auf ihre Gefäßwände einen Druck ausüben, einen um so größeren, je größer die Gasmenge ist, die in dem betreffenden Gefäß enthalten ist. Nach der angeführten Analogie können wir einem gelösten Stoff ganz ebenso einen Druck zuschreiben, den er ausübt, und der zwar nicht die Gefäßwände zu verschieben sucht, der aber den gelösten Stoff in immer größere Mengen Flüssigkeit hineinzutreiben und daher ihn zu verdünnen sucht. Diesen Druck, den man auch durch geeignete Methoden messen kann, nennt man den osmotischen Druck der aufgelösten Substanz. Je größer die Zahl der aufgelösten Moleküle (Grammmoleküle) in derselben Menge Flüssigkeit ist, um so größer ist der osmotische Druck derselben. Das Verhältnis der Zahl der aufgelösten Grammmoleküle einer Substanz zu der Gesamtzahl der Grammmoleküle der Lösung nennt man die Konzentration des betreffenden Stoffes in der Lösung und es ist also der osmotische Druck eines Stoffes in einer Lösung um so größer, je größer die Konzentration desselben ist.

Der osmotische Druck hat also die Tendenz, die Lösung zu verdünnen. Er könnte dies am einfachsten dadurch erreichen, daß er die aufgelösten Moleküle aus der Lösung treibt, also sie zum Ausfällen bringt. Nun aber ist bei den festen Körpern eine gleiche Tendenz vorhanden, nämlich die, sich in vorhandenen Flüssigkeiten aufzulösen. Wenn ein festes Salz mit einer Flüssigkeit in Berührung ist, so gehen von selbst Salzteilchen in die Flüssigkeit über, man kann also auch hier von einem Druck sprechen, der die Salzteilchen in die Flüssigkeit treibt. Diesen Druck bezeichnet man als den Lösungsdruck des festen Körpers. Und nun sieht man, daß der Lösungsdruck vom festen Körper in die Flüssigkeit hinein, der osmotische Druck der aufgelösten Substanz dagegen aus der Flüssigkeit hinaus wirkt, so daß die beiden sich entgegenwirken. Haben wir also jetzt eine verdünnte Salzlösung, so sucht zwar der osmotische Druck die aufgelösten Teilchen herauszutreiben und auszufällen; sobald aber ein Teilchen ausgefällt ist, wirkt der Lösungsdruck und treibt das Teilchen wieder in die Flüssigkeit. Solange also der Lösungsdruck der Substanz größer ist als der osmotische Druck, kann sich kein aufgelöstes Teilchen ausscheiden. Erst wenn die Lösung so konzentriert ist, daß ihr osmotischer Druck größer als der Lösungsdruck der festen Substanz ist, scheiden sich die gelösten Teilchen aus und zwar so lange, bis die Konzentration der Flüssigkeit so weit verringert ist, daß ihr osmotischer Druck gerade gleich dem Lösungsdruck der festen Substanz ist. Dann ist Gleichgewicht zwischen der Lösung und der festen Substanz vorhanden.

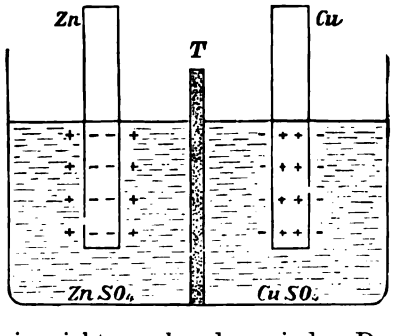
Wenden wir nun diese allgemeinen Vorstellungen, die sich durch Einfachheit und Klarheit auszeichnen und die das Verhalten der Lösungen vollständig zu übersehen gestatten, auf den Fall der galvanischen Elemente an. Wenn wir einen Zinkstab in Wasser stellen, so wird das Zink vermöge des Lösungsdruckes zunächst sich auflösen, also Zinkteilchen

in die Lösung zu treiben suchen. Bei Auflösung von Metallen nun muß man annehmen, da ja die Metallionen immer positiv geladen sind, daß sie eben Ionen, d. h. positiv elektrisch geladene Teilchen, nicht neutrale Moleküle in die Lösung senden. Dadurch wird nun das Wasser, welches die Zinkionen bekommt, positiv elektrisch werden, während das Zink, das positive Ladung verloren hat, dadurch negativ elektrisch zurückbleibt. Dadurch ist nun zunächst eine Vorstellung dafür gebildet, daß jedes Metall, das in Wasser taucht, sich negativ elektrisch erweist.

Aber eine weitere Folgerung dieser Ladungen ist nun die, daß überhaupt nur außerordentlich geringe Mengen des Metalls sich auflösen können. Denn die stark positiv geladenen Ionen und das stark negativ geladene Metall ziehen sich an und es wird also der Übergang weiterer Ionen in die Lösung dadurch verhindert, so daß also nur unwägbare Mengen des Metalls sich auflösen und dadurch schon den Spannungsunterschied zwischen Metall und Flüssigkeit hervorbringen.

Ist nun aber die Flüssigkeit, in der das Metall steht, nicht reines Wasser, sondern eine Lösung des betreffenden Metallsalzes, so wird ein Unterschied eintreten, je nachdem der Lösungsdruck des betreffenden Metalles groß oder klein ist gegenüber dem osmotischen Druck der Lösung. Die edlen Metalle: Gold, Platin, Silber, Kupfer haben im allgemeinen sehr kleine Lösungsdrucke, die unedlen Metalle: Zink, Kadmium, Eisen sehr große. Ist also nun ein Zinkstab in Zinksulfat, so haben die Zinkionen in der Lösung einen gewissen osmotischen Druck, einen um so größeren, je größer die Konzentration der Lösung ist. Dieser wirkt dem Lösungsdruck entgegen, immer aber bleibt der Lösungsdruck noch größer, so daß immer noch Zinkionen von dem Metall in die Flüssigkeit gesendet werden, das Metall also sich negativ, die Flüssigkeit sich positiv ladet, wie in reinem Wasser, nur schwächer. Steht dagegen ein Kupferstab in Kupfervitriollösung, so ist im allgemeinen der osmotische Druck der Lösung größer als der Lösungsdruck des Kupfers, es werden sich also positive Kupferionen aus der Lösung auf dem Metall niederschlagen, das Metall wird positiv und die Lösung negativ elektrisch sein. Nachdem unwägbare Mengen niedergeschlagen sind, wird auch hier Gleichgewicht vorhanden sein, weil die elektrostatischen Kräfte den weiteren Vorgang verhindern. In Fig. 128 ist der Zustand dargestellt, den ein Zinkstab Zn in Zinkvitriollösung ($ZnSO_4$) und ein Kupferstab Cu in Kupfervitriollösung ($CuSO_4$), die durch eine Tonwand T getrennt sind, zeigen werden, wenn beide Metalle frei, nicht verbunden sind. Das Zink wird negativ geladen sein, die benachbarte Flüssigkeit positiv; umgekehrt wird das Kupfer positiv und die benachbarte Flüssigkeit negativ geladen sein.

Fig. 128.



Werden nun die Metalle verbunden, so gleichen sich die Ladungen

auf ihnen aus und infolgedessen kann nun das Zink neue Ionen in die Lösung senden, während aus der Kupfervitriollösung sich von frischem Kupfer auf der Elektrode niederschlagen kann.

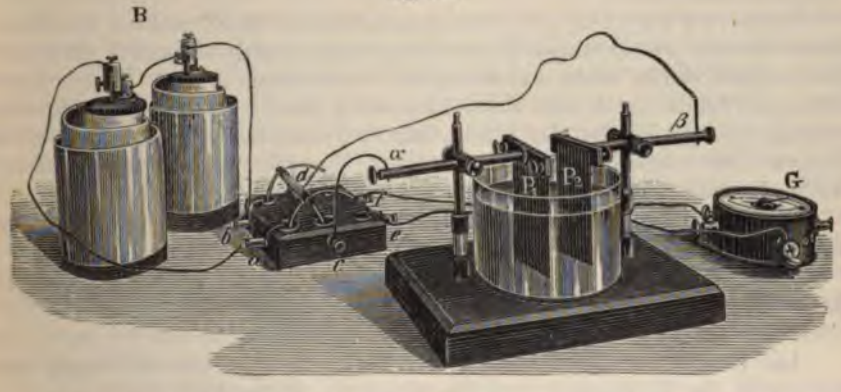
Man erkennt aus dieser Vorstellung sofort folgendes. Je geringer der osmotische Druck der Zinksulfatlösung ist, um so leichter können die Zinkionen aus dem Zink austreten, desto größer wird also der Spannungsunterschied zwischen Zink und Flüssigkeit sein. Umgekehrt, je größer der osmotische Druck der Kupfersulfatlösung ist, um so mehr Ionen werden aus der Lösung ausgefällt, um so größer wird also der Spannungsunterschied zwischen Kupfer und Flüssigkeit sein. Die elektromotorische Kraft des Elementes, welche die Summe beider Spannungsunterschiede ist, wird also wachsen, wenn die Kupfervitriollösung konzentrierter, die Zinksulfatlösung verdünnter genommen wird. Das ist tatsächlich auch der Fall. Und Ähnliches findet bei jedem anderen Element statt. So sind nicht bloß qualitativ, sondern quantitativ die Vorgänge bei der Stromerzeugung durch galvanische Elemente erklärt.

Kehren wir nun zurück zu der Elektrolyse von Flüssigkeiten, durch die ein Strom hindurchgeht. Wie wir schon mehrfach gesehen haben, ist jede von der Richtung des galvanischen Stromes abhängende Wirkung desselben im stande, umgekehrt wieder einen galvanischen Strom zu erzeugen. Dies zeigt sich auch bei den elektrolytischen Wirkungen des Stromes. Wenn man einen galvanischen Strom durch eine Zersetzungszelle schickt und durch ihn die Flüssigkeit elektrolysieren läßt, so wird die Zelle dadurch zu einem galvanischen Element, d. h. es entsteht in ihr eine elektromotorische Kraft, welche selbst umgekehrt im stande ist, einen Strom zu erzeugen. Man kann das in gewissen Fällen a priori einsehen. Lassen wir z. B. den Strom vermittels zweier Bleiplatten durch verdünnte Schwefelsäure gehen, so wird diese elektrolysiert, und es scheidet sich an der einen Bleiplatte Sauerstoff ab, welcher diese Platte oxydiert und, wenigstens an ihrer Oberfläche, zu Bleisuperoxyd umwandelt, was man an der Braunfärbung derselben sofort erkennt, während an der anderen Platte Wasserstoff entweicht. In der Zersetzungszelle stehen also jetzt nicht mehr zwei Platten aus gleichem Metall, zwei reine Bleiplatten, sondern eine mit Bleisuperoxyd bedeckte Platte und eine reine Bleiplatte. Zwei verschiedene leitende Stoffe in einer Flüssigkeit sind aber elektrisch gegeneinander wirksam; folglich muß durch die Elektrolyse in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft erzeugt sein. Diese Forderung einer einfachen Überlegung zeigt sich nun tatsächlich in der Natur erfüllt. Aber nicht nur dann, wenn sich die eine Elektrode mit einer sichtbaren Schicht eines anderen Stoffes überzieht, tritt in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft auf. Selbst in Fällen, wo man eine Veränderung der Elektroden nicht erkennen kann und nicht vermuten sollte, sind die Elektroden nach dem Durchgang eines Stromes elektromotorisch gegeneinander wirksam. Tauchen wir z. B. zwei Platinplatten in angesäuertes Wasser und schicken wir einen Strom durch die Zersetzungszelle hindurch, so wissen wir, daß sich an der einen Elektrode Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff bildet. Diese Gase, sollte man meinen, verändern die Platinelektroden nicht, so daß diese hierbei nicht elektromotorisch gegeneinander wirksam werden können. Trotzdem werden sie es hier auch. Bei j e d e r

elektrolytischen Zersetzung kommen die Elektroden in einen veränderten Zustand, der bewirkt, daß sie nun elektromotorisch gegeneinander wirksam sind. Man hat für diesen Zustand das Wort P o l a r i s a t i o n eingeführt. Man sagt: die Elektroden werden p o l a r i s i e r t. Wenn man polarisierte Elektroden durch einen Draht miteinander verbindet, so fließt durch diesen Draht und die Zersetzungsstelle ein elektrischer Strom. Man nennt diesen Strom den P o l a r i s a t i o n s s t r o m. Wenn man also z. B. von einer Daniellschen Kette den Strom mittels zweier Platinelektroden in ein Gefäß mit angesäuertem Wasser sendet, so werden die Platinelektroden polarisiert. Trennt man nun die Platinelektroden von der Daniellschen Kette und verbindet sie mit einem Galvanometer, so schlägt die Nadel des Galvanometers aus und zeigt dadurch das Vorhandensein eines Stromes, des Polarisationsstromes, an.

Auf einfache Weise wird diese abwechselnde Verbindung der Zersetzungszelle einmal mit der galvanischen Kette und darauf mit einem

Fig. 129.



Galvanoskop durch einen Kommutator wie den in Fig. 62 hergestellt, von dem die mittleren Querdrähte herausgenommen sind. Verbindet man wie in Fig. 129 zwei Bunsenelemente B mit den Quecksilbernäpfen a und b und die Zersetzungszelle P_1 P_2 mit den Näpfchen c und d, und legt den Bügel des Kommutators wie in dieser Figur nach links, so polarisiert der Strom die Elektroden in der Zersetzungszelle. Schlägt man dann aber den Bügel nach rechts, so ist die Zersetzungszelle P_1 P_2 nicht mehr mit den Bunsenschen Elementen, sondern mit dem Galvanoskop G verbunden, das an die Quecksilbernäpfe e und f gelegt ist, und die Galvanoskopnadel macht einen Ausschlag und zeigt so den Polarisationsstrom an.

Ob dabei die Zersetzungszelle aus Schwefelsäure mit Platinelektroden oder sonst aus irgend einem Elektrolyten mit Elektroden aus irgendwelchem Metall besteht, ist ganz gleichgültig; immer werden durch den Durchgang des Stromes durch eine elektrolysierbare Flüssigkeit die Elektroden polarisiert und dadurch wird in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft erzeugt.

Diese elektromotorische Kraft nun erzeugt einen Strom, dessen Richtung der des ursprünglichen, polarisierenden Stromes entgegengerichtet ist.

Es fließt z. B. in der Fig. 129 der positive Strom von der Kette B über a, c, α nach P_1 und von diesem durch die Flüssigkeit zu P_2, dann durch β, d, b nach B zurück. Im Polarisationsstrom fließt nun umgekehrt der positive Strom von P_2 durch die Flüssigkeit zu P_1, also geht er in der Richtung P_2, P_1, α, c, e, G, f, d, β. So ist es nicht nur bei dem in der Figur angenommenen Falle, daß Platinelektroden in angesäuertem Wasser polarisiert werden, sondern überhaupt immer. Der Polarisationsstrom hat immer in der polarisierten Zelle die entgegengesetzte Richtung als der ursprüngliche Strom, den man auch den polarisierenden Strom nennt. Die Platte P_1 ist mit dem positiven Pol der Batterie, P_2 mit dem negativen Pol verbunden. Nach der Polarisierung fließt der Strom im Element von P_2 nach P_1, also außerhalb von P_1 durch das Galvanometer nach P_2. Die Platte P_1 ist also für den Polarisationsstrom die positive Elektrode. Allgemein ist diejenige Elektrode, die bei der Polarisierung mit dem positiven Pol der Batterie verbunden war, auch die positive Elektrode für den Polarisationsstrom.

Schon während der polarisierende Strom fließt, werden die Elektroden in der Zersetzungszelle elektromotorisch gegeneinander wirksam, und es fließt daher schon während der Polarisierung von der Zersetzungszelle ein Strom durch den Schließungskreis dem polarisierenden Strome entgegen. Es wird also der Strom, der von einer Batterie, z. B. ein Paar Bunsen, durch eine Zersetzungszelle fließt, durch den in entgegengesetzter Richtung fließenden Polarisationsstrom geschwächt.

Wir haben zwei einander entgegenwirkende elektromotorische Kräfte und müssen also das Ohmsche Gesetz schreiben:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektrom. Kraft der Batterie} - \text{Elektrom. Kraft der Polarisation}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Die Stärke der Polarisierung der Elektroden ist nun abhängig von der Natur der Elektroden und der zersetzten Flüssigkeit.

Es werden ja durch den polarisierenden Strom die Anionen der Lösung zur Anode, die Kationen der Lösung zur Kathode getrieben, geben dort ihre Ladungen ab und bleiben als unelektrische Moleküle entweder ganz oder zum Teil an den Elektroden haften. Die gasförmigen Körper, wie Wasserstoff und Sauerstoff, entweichen zum Teil in die Luft, zum Teil werden sie von den Elektroden aufgenommen und okkludiert. Die an oder in den Elektroden sich ablagernden Schichten haben aber wieder die Tendenz, in Lösung überzugehen, sie haben wieder einen Lösungsdruck und dieser Lösungsdruck treibt sie wieder in die Flüssigkeit hinaus, entgegen der Richtung des polarisierenden Stromes. Das ist der Grund, warum der Polarisationsstrom die entgegengesetzte Richtung in der Flüssigkeit hat wie der polarisierende Strom.

Jedes polarisierte Element hat daher eine bestimmte elektromotorische Kraft, die abhängt von der Natur der Stoffe, die auf den Elektroden niedergeschlagen sind, und von der Natur der Flüssigkeit. Es wird also, wenn die Stärke des polarisierenden Stromes wächst, die elektromotorische Kraft des Polarisationselementes zuerst zunehmen bis zu diesem Wert, dann aber *nahezu* konstant auf der einmal erreichten Höhe bleiben, so daß eine Ver-

größerung der polarisierenden Stromstärke dann keinen weiteren Erfolg mehr hat. Falls nun die elektromotorische Kraft des polarisierenden Stromes unter diesem Maximum liegt, so kann sie selbstverständlich die Elektroden der Zersetzungszelle nicht bis zum Maximum ihrer Polarisation laden; denn sowie die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes die des ladenden Elementes überwiegen würde, würde ja der Strom in umgekehrter Richtung fließen und die Polarisation wieder aufheben. Es ist dann also, bis zu diesem Maximum, die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes gleich der des polarisierenden Stromes. Bei Platinelektroden in angesäuertem Wasser beträgt das Maximum der Polarisation 2,7 Volt; dies ist die höchste elektromotorische Kraft, die sich bei der Polarisation von Platinplatten in angesäuertem Wasser erzeugen läßt. So hat ein jedes polarisierte Element eine bestimmte elektromotorische Kraft.

Wenn man nun von einem polarisierten Elemente, welches man auch ein sekundäres Element nennt, den Strom durch einen Schließungskreis fließen läßt, so fließt er durch dieses Element selbst in umgekehrter Richtung, als vorher der polarisierende Strom geflossen war. Er bringt nun in dem sekundären Element selbst auch wieder Elektrolyse hervor, und da er in umgekehrter Richtung fließt wie der polarisierende Strom, so wird an der Platinplatte, die mit Sauerstoff bedeckt war, jetzt Wasserstoff erzeugt, und an derjenigen, die mit Wasserstoff bedeckt war, jetzt Sauerstoff erzeugt. Folglich nimmt die Dicke der fremden Schicht auf den Platten allmählich ab, wenn der Strom fließt, und immer mehr ab, je länger er fließt. Wenn schließlich die abgeschiedenen Schichten auf den Platinplatten ganz neutralisiert, ganz verschwunden sind, so hört der Polarisationsstrom ganz auf. Der Polarisationsstrom aus einer polarisierten Zelle dauert also nur eine bestimmte Zeit hindurch, so lange, bis die chemische Veränderung auf den Elektroden wieder ganz zurückgebildet ist.

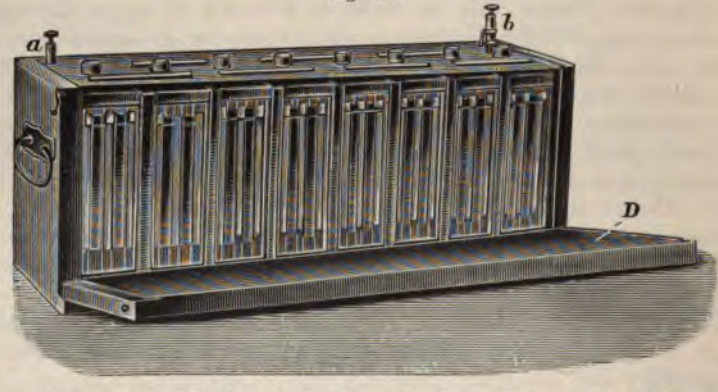
Natürlicherweise kann man eine Reihe von sekundären Elementen auch hintereinander oder nebeneinander verbinden. Man bekommt dann eine Polarisationsbatterie oder Sekundärbatterie. Man kann also durch eine Reihe von solchen sekundären Elementen eine Batterie von sehr großer elektromotorischer Kraft bekommen, die außerordentlich starke Ströme liefert, aber natürlich nur eine gewisse Zeit hindurch. Zu neuem Gebrauch muß man dann die Batterie von neuem polarisieren oder, wie man sagt, laden. In der technischen Anwendung bezeichnet man diese Sekundärbatterien als Akkumulatoren, weil sie gestatten, die Energie des polarisierenden Stromes aufzusammeln und anzuhäufen. In Kapitel 3 des zweiten Teiles werden diese Akkumulatoren ausführlicher besprochen. Hier sei nur erwähnt, daß die jetzt gebräuchlichen Akkumulatoren eben gerade aus Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure bestehen. Beim Polarisieren durch einen äußeren Strom, beim Laden des Akkumulators, wird die eine Bleiplatte durch den herantretenden Sauerstoff auf eine gewisse Dicke in Bleisuperoxyd verwandelt, während die andere zu reinem Blei wird. Wenn der Akkumulator geladen ist, so hat er eine elektromotorische Kraft von 2,02 Volt und kann nun bei der Verbindung der Pole durch einen äußeren Schließungskreis, bei der Ent-

ladung, so lange Strom abgeben, bis seine Ladung nahezu aufgebraucht ist. Solche Bleiakkumulatoren sind nicht bloß im großen sehr bequem, wie im zweiten Teil besprochen wird, sondern auch für den Gebrauch im kleinen, zu Experimenten, sehr empfehlenswert als Ersatz für die galvanischen Elemente. Fig. 130 zeigt einen kleinen, bequem tragbaren Akkumulator von 2 Volt Spannung. Bei a und b sind die Pole. Die Zelle ist von einem geschlossenen Ebonitkästchen umgeben. Fig. 131 zeigt einen größeren Akkumulator von 16 Volt Spannung, der also acht größere Zellen enthält. Diese sind in einem tragbaren Holzkasten mit beweglicher Seitenwand D enthalten, die für gewöhnlich zugeklappt wird. Bei a und b sind die Pole der Batterie.

Fig. 130.

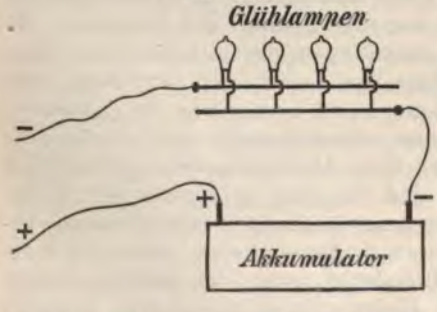
Ein solcher Akkumulator muß also von Zeit zu Zeit geladen werden, um immer wieder Strom abgeben zu können. Bei den gebräuchlichen

Fig. 131.



Akkumulatoren ist die Stromstärke, durch welche jede Zelle geladen werden soll, nach der Größe der Platten so ausprobiert, daß eine höhere als die angegebene Stromstärke der Haltbarkeit des Akkumulators schädlich ist. So werden z. B. Akkumulatoren von der in Fig. 131 gezeichneten Größe mit etwa $^1/_2$ bis 1 Ampere geladen. Diese Ladungen nimmt man da, wo durch elektrische Zentralen Strom verteilt wird, natürlich am besten mit dem Zentralenstrom vor. Da dieser aber gewöhnlich eine Spannung von 110 Volt besitzt, also dem Akkumulator, wenn er direkt eingeschaltet würde, viel zu starken Strom liefern würde, so schaltet man zweckmäßig einen Glühlampenrheostaten (S. 112) vor. Das Schema der Stromleitung ist dann durch Fig. 132 gegeben. Von der Stromquelle (der Zentrale) wird der + Pol mit dem + Pol des Akkumulators verbunden und vom — Pol

Fig. 132.



desselben geht die Leitung durch einen Glühlampenrheostaten (oder auch eine einzelne Glühlampe) zum —Pol der Stromquelle. Da gewöhnlich die + und —Pole der Stromquelle nicht bezeichnet sind, so kann man die richtige Verbindung durch einfaches Probieren finden. Bei der richtigen Verbindung des Akkumulators und der Stromquelle müssen nämlich die Glühlampen schwächer leuchten als normal, weil Hauptstrom und Akkumulatorenstrom dabei einander entgegenwirken; bei der falschen Verbindung müssen die Glühlampen dagegen heller brennen, weil die beiden Ströme sich addieren.

Eine große Reihe von kleinen Akkumulatoren, mehrere tausend, hintereinander geschaltet, die also Spannungen von mehreren tausend Volt geben, werden als Hochspannungsakkumulatoren bezeichnet. Fig. 133 gibt eine Ansicht einer Batterie von 25 solcher kleinen Zellen, wie sie in der physikalisch-technischen Reichsanstalt benutzt werden. Jedes einzelne Glas enthält zwei Bleiklötze als Elektroden und ist oben

Fig. 133.

dicht abgeschlossen. Ein Glasröhrchen führt in das Innere des Glases und erlaubt einerseits eine Füllung des Glases mit Schwefelsäure, andererseits ein Entweichen der bei der Ladung auftretenden Gase. Natürlich muß man zur Ladung einer solchen Hochspannungsbatterie, wenn man etwa 110 Volt im ladenden Strom zur Verfügung hat, immer je eine Reihe von 50 Zellen einzeln laden, oder mehrere Reihen von 50 Zellen parallel schalten. Schaltet man dann die Reihen alle oder zum Teil hintereinander, so kann man also Ströme von sehr hoher Spannung erhalten. Da bei solch hochgespannten Strömen es sehr auf die Isolation aller Teile ankommt, so sind die einzelnen Elemente vollkommen isoliert aufgestellt.

Das Auftreten der Polarisation in einer von einem Strome durchflossenen Flüssigkeit klärt uns nun auch auf, warum es nicht möglich ist, die Widerstände von Flüssigkeiten in derselben Weise durch die Methode der Wheatstoneschen Brücke zu bestimmen, wie die von festen Körpern. Fließt nämlich der Strom durch eine Flüssigkeit, so tritt eine entgegenwirkende elektromotorische Kraft auf, deren Größe man nicht kennt und die überdies veränderlich ist. Für diese gilt dann die direkte Methode der Widerstandsmessung durch die Wheatstonesche Brücke nicht. Um eine Flüssigkeit nun doch einfach wie einen Leiter erster Klasse behandeln zu können, ist es notwendig, die Polarisation aufzuheben, und das geschieht

eben durch Wechselströme, wie wir auf S. 93 gesehen haben. Gegen Wechselströme verhält sich ein Leiter zweiter Klasse wie ein Leiter erster Klasse. Es tritt keine Polarisation auf und man kann die Flüssigkeit dann ebenso behandeln wie ein Metall.

In manchen Fällen kann ein elektrischer Strom, wenn er durch eine Flüssigkeit, diese elektrolysierend, hindurchgeht, noch besondere auffallende Wirkungen hervorbringen. Es kann nämlich vorkommen, daß die an der einen oder der anderen Elektrode abgeschiedenen Substanzen mit dieser Elektrode eine chemische Verbindung erzeugen, die ein so schlechter Stromleiter ist, daß der Stromdurchgang dabei ganz oder fast ganz aufhört. Man sagt dann, es werde an der Elektrode ein Übergangswiderstand erzeugt. Das auffallendste Beispiel dafür gibt die Elektrolyse von Flüssigkeiten, wie etwa Alaunlösungen, wenn die eine Elektrode und zwar die positive aus Aluminium besteht. Es scheidet sich dann durch einen hindurchgeschickten Strom an der Aluminiumelektrode Sauerstoff ab und dieser geht mit dem Aluminium eine Verbindung ein, die den Strom so schlecht leitet, daß der Stromdurchgang dadurch sofort aufgehoben wird. Wenn man elektromotorische Kräfte bis 22 Volt anwendet, so kann man durch eine solche Zelle in derjenigen Richtung, in welcher das Aluminium Anode ist, nur ganz schwache Ströme, solche von wenigen Milliampere hindurchbringen, während bei größeren angewendeten elektromotorischen Kräften trotz des Übergangswiderstands stetig wachsende Ströme hindurchgehen. Die Aluminiumelektrode sperrt, wenn sie mit dem positiven Pol verbunden ist, wie der Verfasser gezeigt hat, in Alaun von jeder angewendeten Spannung 22 Volt ab. Wenn man die Stromrichtung umkehrt, also die Aluminiumelektrode mit dem negativen Pol verbindet, so geht dagegen der Strom ohne Schwierigkeit mit seiner vollen Spannung durch die Zelle. Eine solche Zelle mit einer positiven Aluminiumelektrode und einer beliebigen negativen Elektrode (z. B. aus Blei oder Eisen oder Kohle) wirkt also wie ein Ventil. Sie läßt Ströme, deren Spannung bis 22 Volt beträgt, in der einen Richtung nicht hindurch, in der anderen Richtung, in der das Aluminium Kathode ist, wohl. Man nennt diese Zellen Graetzsche Zellen oder Drosselzellen. Man kann statt des Alauns in einer solchen Zelle irgend eine andere Flüssigkeit benutzen, welche nur die Eigenschaft haben muß, an der Anode Sauerstoff direkt oder durch sekundäre Prozesse zu entwickeln. Am vorteilhaftesten hat sich als Flüssigkeit die Lösung von phosphorsauren Salzen, Ammonium- oder Natrium- oder Kaliumphosphat erwiesen. Mit einer solchen Flüssigkeit drosselt eine derartige Zelle nicht bloß 22, sondern sogar mehr als 100 Volt Spannung ab, wenn das Aluminium Anode ist. Im zweiten Teil Kap. 4 wird eine wichtige Anwendung dieser Zellen beschrieben werden.

7. Kapitel.

Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Alle Wirkungen eines galvanischen Stromes, die in den vorhergehenden Kapiteln besprochen wurden, fanden in der Bahn des Stromes selbst statt. Der Stromkreis wurde erwärmt nach dem Jouleschen Gesetz, an den Verbindungsstellen zweier verschiedener Metalle trat die Peltiersche Wirkung auf. An der Unterbrechungsstelle eines starken Stromes entstand der galvanische Lichtbogen; Flüssigkeiten endlich, die vom Strome durchflossen wurden, wurden elektrolysiert, in ihre Bestandteile zerlegt.

Mit diesen bisher angeführten Erscheinungen sind aber die Wirkungen des galvanischen Stroms lange nicht erschöpft. Schon bei der Meßmethode, welche wir für den galvanischen Strom anwendeten, mittels eines Galvanometers, hatten wir die Wirkung des Stromes auf einen Magneten benutzt, indem die Ablenkung der Magnetnadel von ihrer natürlichen Nord-Südrichtung uns das Vorhandensein eines elektrischen Stroms anzeigte. Diese Wirkung ist jedoch nur eine ganz spezielle in einer großen, allgemeinen Klasse von Beziehungen, welche durch die fortgesetzten Untersuchungen der verschiedensten Physiker zwischen Elektrizität und Magnetismus aufgedeckt wurden. Man faßt die gesamte Lehre von den Beziehungen der elektrischen Ströme zum Magnetismus unter dem Namen „Elektromagnetismus“ zusammen.

Jeder Magnet hat bekanntlich zwei Pole, einen Nordpol und einen Südpol. Wir benutzen solche Magnete gewöhnlich in der Form von Stäben, wie Fig. 134, oder von Hufeisen, wie Fig. 135, oder von Nadeln, wie Fig. 136. Hängt man einen Magnetstab oder eine Magnetnadel auf, so daß sie sich horizontal frei drehen können, so stellen sie sich, wie man weiß, immer in eine ganz bestimmte Richtung. Dasjenige Ende, welches nach dem Norden der Erde zeigt, nennt man den Nordpol, das entgegengesetzte den Südpol des Magneten. Jeder Magnet hat ferner noch die bekannte wichtige Eigenschaft, daß er andere Magnete anzieht, resp. abstößt. Es sind die Gesetze der Anziehung und Abstoßung von zwei Magnetpolen genau dieselben wie diejenigen der Anziehung und Abstoßung von zwei elektrischen Körpern. Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an. Nur können wir niemals einen einzigen Magnetpol allein erzeugen, sondern immer ist an demselben Stück Eisen auch der entgegengesetzte Pol vorhanden. Das ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber der Elektrizität. Denn bei dieser können wir einen Körper bekanntlich positiv laden, etwa durch Reibung, und die negative Elektrizität einem ganz anderen, entfernten Körper mitteilen. Bei einem Magneten sind aber im Gegensatz dazu immer die beiden Pole an demselben Stück Eisen zusammen, niemals

an getrennten Stücken, und daher hängen auch die Kräfte, die ein Magnet zeigt, immer von beiden Polen ab. Doch kann man den Magneten so lang machen, etwa eine lange magnetisierte Stricknadel nehmen, daß man oft im wesentlichen nur die Wirkung eines einzigen Poles beobachten kann.

Fig. 134.

Fig. 135.

Fig. 136.

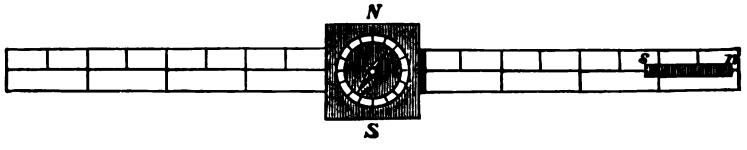
Daß eine Magnetnadel von selbst immer nach Norden zeigt, erklärt man sich bekanntlich daraus, daß die ganze Erde selbst ein Magnet ist, dessen Südpol im Norden liegt, so daß alle Nordpole von Magnetstäben sich nach ihm hindrehen. Man bezeichnet diejenige Richtung, in der sich eine drehbare Magnetnadel an einem beliebigen Ort der Erde einstellt, als den magnetischen Meridian dieses Ortes. Dieser stimmt ungefähr, aber nicht ganz mit dem geographischen Meridian dieses Ortes überein. Man muß also annehmen, daß an jeder Stelle der Erdoberfläche die Magnetnadel mit einer gewissen Kraft in die Richtung des Meridians gezogen und dort gehalten wird, so daß, wenn man die Nadel aus dem Meridian herausdreht, sie sich nach einigen Schwingungen wieder in denselben einstellt. Man sagt, die Erde besitze an jedem Punkt ihrer Oberfläche eine gewisse magnetische Horizontalintensität. Diese ist verschieden groß an den verschiedenen Punkten der Erde und wir werden bald ein Mittel finden, um sie der Größe nach zu messen.

Wir müssen nämlich, um die Erscheinungen des Magnetismus genau zu verstehen, versuchen, sie quantitativ in Zahlen auszudrücken. Schon aus dem bloßen einfachen Versuch, daß wir etwa einen in der Hand gehaltenen Schlüssel von einem Magneten anziehen lassen, erkennen wir, daß verschiedene Magnete verschieden stark wirken. Man sagt von einem Magneten, der eine stärkere Wirkung ausübt als ein anderer, er habe ein größeres magnetisches Moment, und wir wollen zuerst versuchen, die magnetischen Momente verschiedener Magnete miteinander numerisch zu vergleichen. Das einfachste Mittel dazu ist folgendes. Wir setzen (Fig. 137) eine Kompaßnadel auf die Mitte eines geteilten Maßstabes und bringen unseren Magnetstab s n, dessen Moment wir bestimmen wollen, in einige Entfernung von der Nadel in die Lage, die in der Figur

bei s n gezeichnet ist. Die Kompaßnadel wird infolge der magnetischen Wirkung des Stabes um einen kleinen Winkel aus dem Meridian herausgedreht werden. Bringen wir an Stelle von s n andere, verschieden starke Magnetstäbe, so wird die Nadel um verschieden große Winkel herausgedreht werden und diese Ablenkungen der Nadel bieten uns ein Maß für die Größe der magnetischen Momente unserer Stäbe. Wir können auch umgekehrt die verschieden starken Stäbe in verschiedene Entfernungen bringen, so daß die Nadel jedesmal um den gleichen Winkel sich dreht. Die Momente der einzelnen Stäbe verhalten sich dann umgekehrt wie die dritten Potenzen der Entfernung der Nadelmitte von der Mitte des Magnetstabes. Wir brauchen nun bloß noch einen bestimmten Stab als Einheit festzusetzen und also zu sagen, daß er die Einheit des magnetischen Moments haben soll, so können wir alle magnetischen Momente von Magnetstäben, Nadeln u. s. f. in diesen Einheiten ausdrücken. In den gewöhnlich gebrauchten Einheiten hat z. B. ein Magnetstab von etwa 15 cm Länge und der Form wie der in Fig. 134, wenn er kräftig magnetisiert ist, ein Moment von etwa 1000 Einheiten.

Sind irgendwo in einem Raume magnetische Kräfte aus irgend einer Ursache vorhanden, so wirken sie auf einen Magnetstab oder eine Magnet-

Fig. 137.



nadel, die drehbar aufgehängt sind, ein, indem sie den Stab oder die Nadel in solche Lage zu bringen suchen, daß diese sich in die Richtung der Kraft einstellen. Man kann daher umgekehrt aus der Richtung, in der sich eine kleine Magnetnadel einstellt, wenn sie frei beweglich ist, auf die Richtung der magnetischen Kräfte schließen. Davon werden wir bald eine Anwendung machen. Man bezeichnet einen Raum, in welchem aus irgendwelcher Ursache magnetische Kräfte wirken, als ein magnetisches Feld. Insbesondere hat also die Erde auch ein magnetisches Feld. Je stärker die Kräfte sind, die ein magnetisches Feld auf einen gegebenen Magnetstab ausübt, um so größer, sagen wir, ist die Intensität des Feldes oder die Feldstärke.

Wir können nun offenbar mittels eines Magnetstabes, dessen magnetisches Moment wir kennen, die Intensität des magnetischen Feldes der Erde in horizontaler Richtung, eben die sogenannte Horizontalintensität, an jedem beliebigen Punkte messen. Hängen wir nämlich diesen Stab an einem Faden auf, so stellt er sich zunächst in den Meridian ein, und drehen wir ihn nun willkürlich etwas heraus, so wird er, sobald er losgelassen ist, wieder in die Meridianrichtung zurückzukehren suchen und wird infolgedessen Schwingungen um die Gleichgewichtslage machen. Je stärker die Intensität des magnetischen Feldes ist, um so rascher werden diese Oszillationen verlaufen, und aus der Dauer einer solchen Schwingung, die man leicht messen kann, kann man so die Stärke oder Intensität des

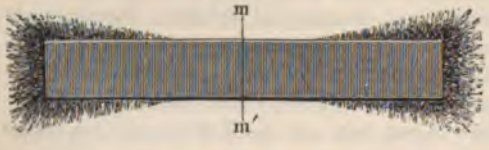
erdmagnetischen Feldes, welches auf den Magnetstab wirkt, messen. Wenn man noch festsetzt, daß diejenige Feldstärke die Einheit sein soll, welche auf einen Magnetstab vom Moment 1 eine drehende Kraft gleich 1 ausübt, so kann man auch alle Feldstärken in bestimmten Zahlen ausdrücken. So findet man, daß die Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche etwas verschiedene Werte hat, die zwischen 0,17 und 0,22 in unseren Einheiten schwanken. In München z. B. ist sie fast genau 0,20.

So wie wir hier die Intensität des magnetischen Feldes der Erde messen konnten, so können wir nun auch, wenigstens im Prinzip, die Intensität jedes magnetischen Feldes bestimmen, das von irgend einem beliebigen Magneten gebildet wird. Natürlich wird ein solches Feld verschiedene Intensität haben, je nachdem man nah an dem Magneten sich befindet oder weit von ihm entfernt. So werden wir z. B. magnetische Felder finden, die so stark sind, daß ihre Intensität durch die Zahl 30 000 ausgedrückt wird, die also 150 000mal so große Intensität haben wie das Horizontalfeld der Erde.

Doch wir wollen zunächst noch einige Eigenschaften der Magnete weiter besprechen.

Ein Magnet wirkt bekanntlich nicht bloß auf einen anderen Magneten mit Anziehungs- und Abstoßungskräften, sondern er wirkt auch auf unmagnetisches Eisen, indem er dieses immer anzieht. Dies beruht auf einer Wirkung, die ganz analog ist der elektrischen Influenz. Wird nämlich ein unmagnetisches Stück weichen Eisens in die Nähe eines Magneten gebracht, so wird es schon dadurch selbst magnetisch, ganz so wie ein unelektrischer Körper in der Nähe eines elektrisierten durch Influenz elektrisch wird. Man sagt auch hier: ein Magnet erzeugt in einem unmagnetischen Stück Eisen Magnetismus durch magnetische Influenz oder Induktion. Deswegen wird weiches unmagnetisches Eisen von einem Magneten immer angezogen. Denn jeder Pol erzeugt in dem genäherten Stück weichen Eisens in seiner Nachbarschaft den entgegengesetzten Pol und entfernt davon den gleichnamigen. Folglich überwiegt die Anziehung zwischen den zwei entgegengesetzten Polen, die nahe bei einander sind, und das influenzierte Stück Eisen wird angezogen. Man kann das sehr deutlich sehen, wenn man einen Magnetstab in Eisenfeilspäne einsteckt und herauszieht; diese bleiben, wie in Fig. 138, an den Enden des Magnetstabes haften, weil jeder Span zu einem Magneten geworden ist.

Fig. 138.



Wird ein induziertes Stück weichen Eisens von dem Magneten wieder entfernt, so hat es seinen Magnetismus vollständig verloren. Anders dagegen ist es mit dem Stahl. Ein durch Influenz magnetisiertes Stück Stahl behält immer ein wenig von seinem Magnetismus zurück, auch wenn es von dem influenzierenden Körper entfernt wird. Man kann bekanntlich unmagnetische Stücke von weichem Eisen und von Stahl durch Bestreichen mit einem schon vorhandenen Magneten magnetisieren. Auch

hierbei zeigt es sich, daß das weiche Eisen seinen Magnetismus sehr rasch verliert, während Stahl ihn behält. Man macht daher dauernde Magnete, sogenannte permanente Magnete, immer aus Stahl, am besten aus Wolframstahl. Im Gegensatz zu den permanenten Magneten nennt man diejenigen, welche nur so lange magnetisch bleiben, als der induzierende magnetische Körper in der Nähe ist, temporäre Magnete.

Ein jeder Magnet ist nicht bloß an seinen Polen magnetisch, sondern überall in seiner ganzen Ausdehnung. An den Polen treten nur die magnetischen Kräfte dadurch besonders scharf zu Tage, daß sie dort starke anziehende und abstoßende Wirkungen ausüben. Werden die Pole eines Magneten durch ein Stück Eisen (welches man den Anker nennt) verbunden, so sagt man, der Magnet ist geschlossen. Ein solcher Magnet übt viel geringere anziehende oder abstoßende Kräfte nach außen aus als ein ungeschlossener, aber er ist trotzdem ein vollständiger Magnet und kann in anderer Weise auch sehr erhebliche magnetische Wirkungen ausüben, wie wir später sehen werden. Einen solchen geschlossenen Magneten nennt man auch einen pollosen Magneten, weil er eben keine freien Pole hat. Das einfachste Beispiel dafür bietet der in Fig. 139 gezeichnete Magnet N S mit seinem Anker m m, ein anderes Beispiel gibt ein magnetisierter Eisenring.

Fig. 139.

Lange Zeit konnte man Eisen nur dadurch magnetisch machen, daß man es mit schon vorhandenen Magneten bestrich oder es dessen Influenzwirkung aussetzte. Es war eine Entdeckung von hervorragender Wichtigkeit, als man erkannte, daß man dasselbe auch mit elektrischen Strömen erreichen kann.

Wenn man einen galvanischen Strom, mag er kommen, woher er wolle, spiralförmig um einen unmagnetischen Stab weichen Eisens herumführt, so wird der Eisenstab magnetisch. Um den Versuch zweckmäßig auszuführen, umwickelt man, wie Fig. 140 zeigt, einen Hohlzylinder von Holz C mit einer Reihe von Windungen aus übersponnenem Draht. Die Enden dieser Drahtwindungen führen nach außen und werden mit den Polen einer galvanischen Batterie verbunden. Es fließt also der Strom um diesen Zylinder in lauter spiralförmigen Windungen. Wenn man nun in die Höhlung des Zylinders einen Stab unmagnetischen weichen Eisens A B hineinbringt, so wird der Stab außerordentlich kräftig magnetisch, und zieht anderes Eisen, z. B. einen Schlüssel an. Das eine Ende des Stabes wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Man nennt deshalb einen solchen mit Draht umwickelten Zylinder eine Magnetisierungsspule. Sowie man den Strom unterbricht, hört der Magnetismus in dem weichen Eisen A B auf und der angezogene Schlüssel fällt wieder ab. Das Eisen ist also nur durch die Wirkung des Stromes magnetisch geworden. Man nennt deshalb einen solchen Mag-

Fig. 140.

neten, der durch den elektrischen Strom erst magnetisch wird, einen Elektromagneten.

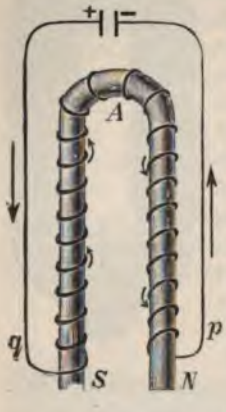
Jeder Magnetstab hat einen Nordpol und einen Südpol; es fragt sich also zunächst, welches Ende des Stabes A B wird hier ein Nordpol, welches ein Südpol? Die Beantwortung dieser Frage wird durch eine Regel gegeben, die von Ampère ausgesprochen ist, und welche die Ampèresche Schwimmerregel heißt:

Denkt man sich in dem Draht der Magnetisierungsspirale in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, so daß man mit dem Gesicht dem Magnetstab zugewendet ist, so ist immer dasjenige Ende des Stabes ein Nordpol, welches zur linken Hand liegt.

Kehrt man also durch einen Kommutator die Richtung des Stromes in der Magnetisierungsspirale um, so wird auch der Magnetismus in A B umgekehrt; dasjenige Ende, das vorher ein Nordpol war, wird jetzt ein Südpol und umgekehrt.

Ebenso wie man einen geraden Stab von weichem Eisen magnetisieren kann, kann man auch einen hufeisenförmig gebogenen Stab magnetisieren. Man braucht nur den Stab oder seine Enden mit Draht spiralförmig fortlaufend zu umwickeln. Fig. 141 zeigt einen solchen umwickelten Hufeisenmagneten. Man kann sich denken, daß der Eisenstab erst gerade gestreckt war und hintereinander nach derselben Richtung umwickelt war, und daß er dann erst hufeisenförmig gebogen wurde. Die Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel zeigt bei der durch die Pfeile angegebenen Richtung des Stromes, daß die beiden Pole bei S und N liegen. Nachdem der Stab hufeisenförmig gebogen ist, scheinen die beiden Enden in entgegengesetzter Richtung umwickelt zu sein. Umwickelt man sie faktisch in entgegengesetzter Richtung, so daß sie dem Anschein nach in gleicher Richtung umwickelt sind, so werden die beiden Enden des Hufeisens gleiche Pole, die entgegengesetzten Pole liegen dann oben in der Biegung des Hufeisens.

Fig. 141.



Auf diese Weise kann man also durch Herumsenden eines galvanischen Stromes um einen weichen Eisenkern außerordentlich starke temporäre Magnete machen. In Fig. 142 ist eine oft benutzte Anordnung gezeichnet, welche zur Hervorbringung sehr starker Elektromagnete dient. Zwei dicke Zylinder aus weichem Eisen stehen auf einem festen Tisch, auf welchem sie durch eine Querplatte von Eisen unten verbunden sind. Um jeden von den Eisenzylindern sind drei Magnetisierungsspulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ geschoben, durch welche der Strom hindurchgesendet werden kann. Die Spulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ können nun nach Belieben so miteinander verbunden werden, daß die beiden herausragenden Enden des Eisenzylinders entgegengesetzt magnetisch werden, der eine ein Nordpol, der andere ein Südpol, oder daß sie beide Nordpole oder beide Südpole werden. Die erste Anordnung ist die am meisten anwendbare und angewendete.

An dem Tisch sind gewöhnlich Klemmschrauben angebracht, um den Strom in die Magnetisierungsspulen einleiten zu können, und außerdem ein Kommutator, welcher dazu dient, die Pole der Magnete rasch wechseln zu können, oder auch den Strom ganz zu unterbrechen und daher den Magnetismus des Eisens ganz aufzuheben. Wenn man die Spulen so verbunden hat, daß das eine Ende des Hufeisens ein Nordpol, das andere ein Südpol ist, und man die Enden der Eisenstäbe von oben ansieht, so fließt der positive Strom um beide in entgegengesetzter Richtung, wie es in Fig. 142 gezeichnet ist. Man kann sich durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel sofort überzeugen, daß die in dieser Figur gezeichnete Stromrichtung die richtige ist. Um stets sofort zu wissen, wie der Strom um einen Magnetpol fließt, kann man sich merken, daß er um einen Südpol, von oben gesehen, in der Richtung fließt, wie der Zeiger einer Uhr sich bewegt, um einen Nordpol entgegengesetzt dem Zeiger einer Uhr.

Fig. 142.

Durch Aufsetzen von zweckmäßig gestalteten Eisenkörpern auf die Pole, die man dann Polschuhe nennt, kann man zwischen diesen ein sehr kräftiges magnetisches Feld erzeugen.

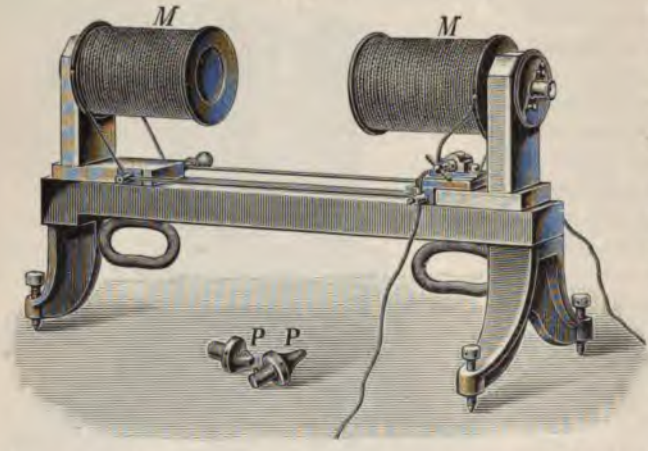
Zwei andere, vielfach benützte Formen der Elektromagnete sind in Fig. 144 und 145 gezeichnet. In Fig. 144 sind zwei mit Draht umwickelte Eisenkerne vorhanden, welche auf der eisernen Grundplatte entweder horizontal oder stehend angebracht werden können. Man sieht in der Figur nebenbei zwei Polschuhe P P mit ziemlich spitz zulaufenden Formen abgebildet, welche in die Pole eingesetzt werden können und nun in dem Zwischenraum zwischen sich auch ein starkes Feld entstehen lassen. Die Umwickelungen der Magnetkerne verbindet man gewöhnlich wieder so, daß die beiden Pole entgegengesetzt magnetisch werden.

Fig. 143.

Die stärksten magnetischen Felder erzielt man durch die Anwendung eines sogenannten Halbringelektromagnetes, wie ihn Fig. 145 zeigt. Bei diesem sind zwei kreisförmig gebogene Eisenstücke auf einer Grundplatte von Eisen angeschraubt. Sie sind mit zusammen acht Magnetisierungsspulen umgeben, welche hintereinander geschaltet werden können. An die Polenden P P können verschieden geformte Pol-

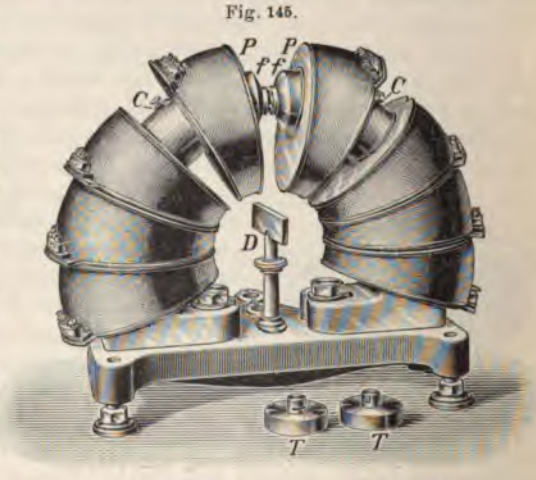
schuhe f f (zwei andere T T sieht man am Boden abgebildet) einfach angesetzt werden, so daß sie zwischen sich einen sehr engen — bis auf 1 mm Dicke herab — Zwischenraum lassen, der nun ein äußerst intensives magnetisches Feld bildet, wenn der Magnet erregt ist. Der Tisch D kann heraufgeschraubt werden, um Gegenstände in oder unter das starke Feld zu bringen.

Fig. 144.



Diese starken magnetischen Felder, deren Feldstärke bei dem Halbringelektromagneten auf die Größe 38 000 gebracht werden kann, wenn die Horizontalintensität der Erde die Stärke 0,2 hat, kann man nicht in derselben Weise messen, wie das schwache Feld der Erde, durch Schwingungen eines Magnetstäbchens, schon aus dem Grunde, weil man ein solches nicht in das starke Feld hineinbringen kann, ohne daß es stark magnetisch induziert wird. Wir werden später bei den Induktionserscheinungen andere Mittel kennen lernen, um die Feldstärke solch starker Felder genau zu messen.

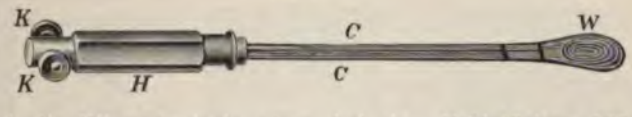
Fig. 145.



Es gibt aber auch eine Methode für die Messung, welche auch nach unseren bisherigen Kenntnissen schon verständlich und anwendbar ist. Es hat sich nämlich experimentell gezeigt, daß der elektrische Widerstand von Wismutdrähten ein anderer ist, wenn das Wismut in einem magnetischen Feld ist, als wenn es nicht magnetisiert ist. Der Widerstand wächst in dem magnetischen Feld, und zwar angenähert im Verhältnis seiner Stärke. Immer wenn die Stärke des Magnetfeldes um 1000 Einheiten (in unserem obigen Maß) zunimmt, wächst der Widerstand des Wismuts um 5% seines ursprünglichen Wertes. Man sieht, daß man daraus umgekehrt, wenn man nur die Widerstandsänderung

eines Wismutdrahtes messend durch die Wheatstonesche Brücke verfolgt, die Stärke des Magnetfeldes bestimmen kann. Zu diesem Zwecke werden von Hartmann & Braun flache Wismutspiralen konstruiert, wie eine in Fig. 146 abgebildet ist. Der Wismutdraht ist bei W in eine flache Spirale gewickelt, welche zum Schutz gegen Zerbrechen mit Glimmerplatten bedeckt ist. Ihre Enden sind an Kupferstäbe CC angelötet, welche isoliert durch den Handgriff H hindurchgehen und die Anschlußklemmen K K für die Widerstandsmessung tragen. Die flache Spirale wird einfach in ein magnetisches Feld hineingestellt. Wenn man ein für allemal bestimmt hat,

Fig. 146.

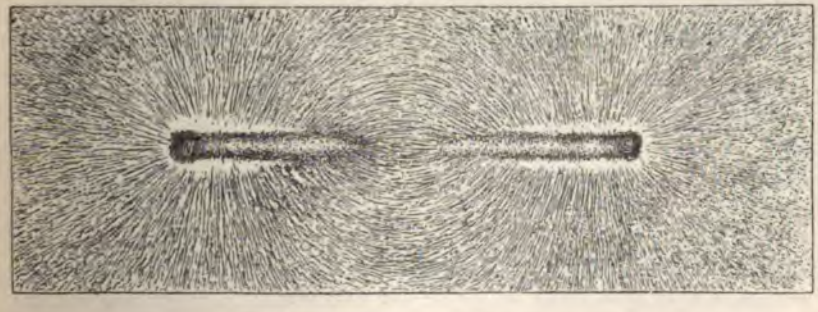


welchen Widerstand die Wismutspirale etwa bei den Feldstärken 100, 1000, 5000 u. s. w. besitzt, d. h. wenn man die Spirale geeicht hat, so kann man umgekehrt aus dem Widerstand die Feldstärke in unseren Einheiten sofort bestimmen.

Für diese starken magnetischen Felder hat sich eine Darstellung und Bezeichnung zweckmäßig erwiesen, welche aus einem einfachen Experimente resultiert.

Legen wir nämlich einen Magnetstab irgendwo auf einen Tisch, bringen über denselben ein Blatt Papier und streuen auf dieses Eisenfeilspäne, so ordnen diese sich so, daß sich immer in der Richtung der magnetischen Kraft je zwei Feilspäne aneinander lagern. Ein Bild dieser Anordnung gibt Fig. 147. Eine jede solche Linie, in der die Eisenfeilspäne sich aneinander reihen, nennt man eine magnetische Kraftlinie. Man

Fig. 147.

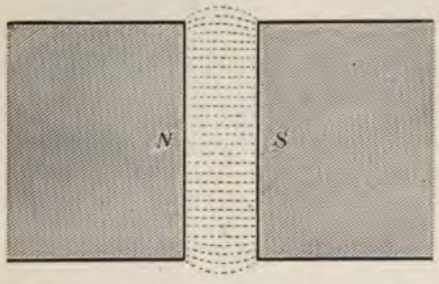


sieht von den Polen aus die Kraftlinien nach allen Richtungen gehen und zwischen den Polen vom Nordpol zum Südpol in krummen Linien übergehen. Man hat auf diese Weise ohne weiteres eine Darstellung von der Richtung der magnetischen Kraft im Felde, wenn man nur noch festsetzt, daß die Kraftlinien immer vom Nordpol in die Luft ausströmen und in den Südpol einströmen sollen. Wenn man einen magnetischen Nordpol für sich herstellen könnte — was aber nicht möglich ist, da jeder noch so kleine Magnet

zwei Pole hat —, so würde ein solcher Nordpol, wenn er in ein solches Feld gebracht werden und in ihm sich frei bewegen könnte, an jeder Stelle der Richtung einer Kraftlinie folgen. Er würde stets vom Nordpol abgestoßen und zum Südpol hingezogen werden.

In den engen Feldern zwischen zwei starken entgegengesetzten Magnetpolen sind die Kraftlinien im wesentlichen gerade Linien, welche vom Nordpol zum Südpol gehen. Nur an den Grenzen des Magnetfeldes sind die Kraftlinien gekrümmt. Fig. 148 stellt die Kraftlinien eines solchen Magnetfeldes dar. Man bezeichnet ein magnetisches Feld, in dem die Kraftlinien geradlinig verlaufen, als ein homogenes Magnetfeld.

Fig. 148.



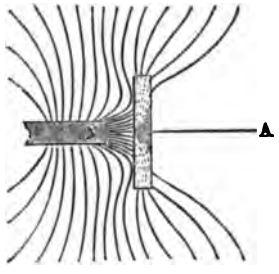
In einem solchen Felde wollen wir nun die Kraftlinien nicht in unbegrenzter Zahl, sondern in bestimmter Zahl zeichnen. Wir wollen nämlich durch jeden Quadratzentimeter des Feldes, der senkrecht zu den Kraftlinien steht, gerade so viel Kraftlinien zeichnen, als die Intensität des Feldes in obigen Einheiten beträgt. Also bei einem Feld von der Feldstärke 20 000 würden wir durch jeden Quadratzentimeter, soweit das Feld diese Stärke hat, 20 000 solche Linien in der Richtung vom Nordpol zum Südpol zu zeichnen haben. In dem Feld unseres obigen Halbringmagneten, wenn es seine größte Stärke hat, müßten wir 38 000 solche Linien pro Quadratzentimeter zeichnen. Das magnetische Feld der Erde ist auch homogen, aber so schwach, daß wir dabei bloß auf je 2 qcm 1 Kraftlinie zu zeichnen hätten. Hat das Feld nicht überall dieselbe Intensität, so ist an den verschiedenen Stellen desselben auch die Zahl der Kraftlinien, die wir pro Quadratzentimeter zu zeichnen haben, verschieden. Man sieht, daß nach dieser Konstruktion es genau dasselbe bedeutet, ob wir sagen, das magnetische Feld hat an einer Stelle die Intensität oder Feldstärke 200, oder ob wir sagen, an dieser Stelle sind pro Quadratzentimeter 200 Kraftlinien vorhanden. Die Einführung der Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, die zuerst etwas gesucht erscheint, bietet aber manche große Vorteile, wie sich namentlich im Kapitel 9 zeigen wird.

Wir wollen nun aus den uns schon bekannten Eigenschaften, die magnetische Körper zeigen, die Eigenschaften der Kraftlinien entnehmen. Zunächst ergibt sich ohne weiteres die folgende.

Bringt man in die Nähe des einen Pols eines Magnetstabes ein Stück weichen Eisens, so wird dieses induziert, und in dem Raum zwischen dem Magneten und dem induzierten Eisen ist die Feldintensität sehr groß, weit größer als an anderen Stellen in der Nähe des Magneten, weil sich eben dem Nordpol N gegenüber ein Südpol S bildet. Es verlaufen also in Fig. 149 die Kraftlinien zwischen dem Pol N und dem induzierten Eisenstück A viel dichter als im übrigen Feld. Wir können dies als eine Eigenschaft der Kraftlinien ausdrücken und sagen: weiches Eisen konzentriert die vorhandenen Kraftlinien des

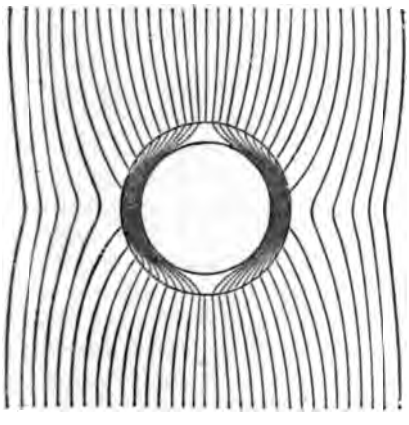
Feldes in sich. So werden auch in Fig. 150, wo ein Ring aus Eisen in einem von Kraftlinien durchzogenen Felde gezeichnet ist, die Kraftlinien in dem Eisenring konzentriert, sie biegen sich also in der Nähe desselben ab und durchsetzen ihn mit viel größerer Dichtigkeit, als sie außerhalb desselben haben. Da wo die Kraftlinien in weiches Eisen eindringen, erzeugen sie einen Südpol, wo sie das weiche Eisen verlassen, erzeugen sie einen Nordpol. Denn wir haben festgesetzt, daß die Kraftlinien eines Magneten immer vom Nordpol nach außen zum Südpol gehen sollen.

Fig. 149.



Die Kraftlinien, die von einem Magnetstab ausgehen, durchsetzen auch das Eisen des Magneten selbst, indem sie in diesem am Südpol eintreten und am Nordpol austreten. Innerhalb des Magneten also haben die Kraftlinien die Richtung vom Südpol zum Nordpol, außerhalb die vom Nordpol zum Südpol. Wird ein bisher unmagnetisches Stück Eisen magnetisch, so gehen von ihm Kraftlinien aus, die vorher nicht vorhanden waren. Verliert das Stück Eisen seinen Magnetismus, so verschwinden auch die Kraftlinien wieder. Man kann das letztere so ausdrücken, daß man sagt: die Kraftlinien, die vorher vorhanden waren, ziehen sich ein, wie die Fühlhörner einer Schnecke sich einziehen, sie wandern aus dem Raume, in dem sie vorher vorhanden waren, durch Einschrumpfung zurück, bis sie schließlich verschwunden sind. Umgekehrt, wenn Eisen magnetisiert wird, so kann man das so darstellen, als ob sich von dem Eisen aus allmählich immer mehr Kraftlinien vorstrecken. Diese Aussagen über die Kraftlinien lehren, wie man sieht, durchaus nichts Neues. Sie geben durchaus keine neue Erfahrungstatsache. Sie geben bloß eine andere und zwar für manche Zwecke vorteilhafte Ausdrucksweise für die schon bekannten Tatsachen.

Fig. 150.



Nicht bloß Eisenkörper werden durch magnetische Induktion magnetisch, sondern, freilich in viel geringerem Grade, auch Nickel und Kobalt und in noch geringerem Grade die meisten anderen Körper, ja auch die Luft und andere Gase. Auch dies ist eine der großen Entdeckungen Faradays, daß er zeigte, daß der Magnetismus eine allgemeine Eigenschaft aller Körper ist, daß alle Substanzen denjenigen Zustand annehmen können, den wir eben Magnetismus nennen und der beim Eisen so überaus kräftig zu Tage tritt. Wenn daher ein Magnet vorhanden ist, welcher nach allen Richtungen magnetische Kräfte ausübt, und wenn in seine Nähe ein Stück weichen, unmagnetischen Eisens gebracht wird, so wird

das sehr stark magnetisch, es konzentriert die Kraftlinien zum größten Teil in sich. Aber ein Teil der magnetischen Kräfte des Magneten wirkt auch außerhalb des Eisens auf die Luft oder die anderen vorhandenen Körper; die magnetische Induktion ist nicht ganz auf das Eisen konzentriert. Es findet, wie man sagt, eine gewisse S t r e u u n g der Kraftlinien statt. Um also die Kraft eines Magneten an bestimmter Stelle möglichst auszunutzen, muß man Anordnungen treffen, daß diese Streuung möglichst gering ist, d. h. daß die magnetischen Kräfte möglichst auf den Raum konzentriert werden, in dem sie gebraucht werden sollen.

Wir gehen nun zu der Betrachtung unserer Elektromagnete zurück, welche uns viel mehr und Neues lehren als die permanenten Stahlmagnete, weil wir ja bei den letzteren die Stärke des Magneten nicht zu ändern imstande sind, während wir bei den Elektromagneten dies durch Verstärkung und Schwächung des magnetisierenden Stromes in weitem Umfang tun können.

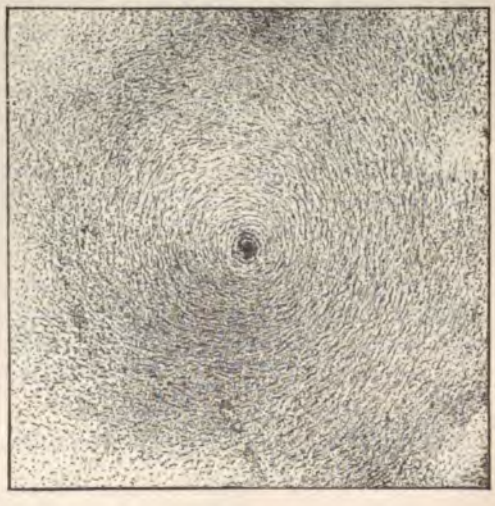
Wenn wir bei einem Elektromagneten den Strom unterbrechen, hört der Magnetismus des Eisens auf. Doch ist das nicht ganz streng richtig. Es dauert nämlich immer eine gewisse kleine, aber meßbare Zeit, bis der Magnetismus aus dem Eisenkern verschwunden ist. Man nimmt zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen an, daß in jedem, auch unmagnetischen, Eisenstücke die Moleküle stets von vornherein selbst magnetisch sind, daß sie aber alle ganz verschiedene Lagen und Richtungen haben, und daß die Wirkung der Magnetisierung, mag sie nun durch Bestreichen mit einem Magneten oder durch Herumführen eines Stromes hervorgebracht sein, darauf beruht, daß alle Moleküle des Eisens sich in dieselbe Richtung stellen. Ein Magnet wäre demnach ein Stück Eisen, bei welchem alle Moleküle gleich gerichtet sind. Es wird weiter angenommen, daß bei gewöhnlichem weichen Eisen die Moleküle infolge einer äußeren magnetisierenden Kraft sich ohne weiteres in ihre neuen Lagen einstellen, daß dagegen beim Stahl es nicht leicht ist, diese Richtungsänderung hervorzubringen. Die Stahlmoleküle hängen so fest miteinander zusammen, daß jeder Richtungsänderung eine erhebliche Kraft entgegenwirkt, die man K o e r z i t i v k r a f t nennt. Wenn das der Fall ist, so ist es einleuchtend, daß ein Stück Stahl nicht leicht magnetisiert werden kann, sondern daß dies nur durch lange dauernde Einwirkung von magnetisierenden Kräften geschehen kann. Ebenso ist es aber auch einleuchtend, daß, wenn ein Stahlstück magnetisiert ist, es magnetisch bleiben muß. Denn die Koerzitivkraft hindert die Moleküle, wieder in ihre alten unregelmäßigen Lagen zurückzukehren, sie bleiben also gleich gerichtet, das Stahlstück bleibt magnetisch. Anders ist es bei dem weichen Eisen. Bei diesem ist die Koerzitivkraft sehr gering, fast verschwindend. Infolgedessen wird weiches Eisen sofort magnetisch, wenn eine magnetisierende Kraft auf dasselbe wirkt, infolgedessen wird es aber auch bald wieder unmagnetisch, wenn die magnetisierende Kraft aufhört. Da aber auch weiches Eisen nicht ganz ohne Koerzitivkraft ist, so wird es auch nicht sofort in voller Stärke magnetisch, wenn der magnetisierende Strom geschlossen wird, sondern die volle Stärke entwickelt sich erst in einiger Zeit, die allerdings nur ein Bruchteil von einer Sekunde ist. Ebenso wird es auch nicht *sofort* nach dem Aufhören des magnetisierenden Stromes ganz unmagne-

tisch, sondern es verliert seinen Magnetismus erst allmählich, wenn auch in sehr kurzer Zeit.

Daraus folgt eine bemerkenswerte Tatsache. Wenn man den Strom, der um einen weichen Eisenstab spiralförmig herumgeführt ist, allmählich verstärkt, so kommt das Eisen nicht sofort zu seiner vollen magnetischen Stärke, sondern bleibt noch etwas zurück, eben wegen der Koerzitivkraft, die überwunden werden muß. Umgekehrt, wenn die Stärke des magnetisierenden Stromes allmählich abnimmt, so nimmt der Magnetismus des Eisenstabes nicht in demselben Tempo ab, sondern er bleibt immer noch etwas größer, weil die Koerzitivkraft die Abnahme des Magnetismus verhindert. Bei gleicher magnetisierender Stromstärke ist also der erzeugte Magnetismus ein kleinerer bei aufsteigendem (stärker werdendem) Strom als bei absteigendem Strom. Diese Erscheinung nennt man Hysteresis (Nachbleiben) des Eisens. Es tritt diese Eigenschaft bei vielen Anwendungen von Elektromagneten störend auf und man muß mit dieser Eigenschaft selbst des weichsten Eisens in manchen Fällen rechnen.

Man kann sich den Vorgang so vorstellen, als ob die Moleküle des Eisens bei ihrer Drehung, bei ihrer Richtungsänderung sich aneinander reiben und dadurch verhindert werden, der einwirkenden Kraft sofort zu folgen. Bei jeder Reibung aber, bei jedem Überwinden eines Widerstandes wird bekanntlich Wärme entwickelt. Es muß daher auch in weichem Eisen durch das Magnetisieren und Entmagnetisieren Wärme entwickelt werden. Wird der Strom nur einmal geschlossen und dadurch der Magnetismus in dem Eisen erregt, so ist diese Erwärmung des Eisens unmerkbar. Wenn aber, wie dies bei elektrischen Maschinen meistenteils geschieht, der Strom sehr rasch hintereinander geschlossen und geöffnet, wieder geschlossen und wieder geöffnet wird, oder wenn er rasch hintereinander verstärkt und dann wieder geschwächt wird, so daß der Magnetismus des Elektromagneten sich fortwährend rasch hintereinander ändert, so wird infolge der Hysteresis jedesmal eine gewisse, wenn auch kleine Wärmemenge erzeugt, und diese kleinen Mengen summieren sich alle, so daß schließlich die Temperatur des Eisens ganz erheblich gesteigert wird, daß das Eisen sich sehr stark erhitzt. Es ist dies ein Übelstand, der bei den elektrischen Maschinen störend auftritt, wie wir später sehen werden.

Fig. 151.



Die Tatsache, daß ein Strom magnetisierend auf weiches Eisen wirkt, zwingt notwendig zu der Annahme, daß ein Strom in seiner Umgebung

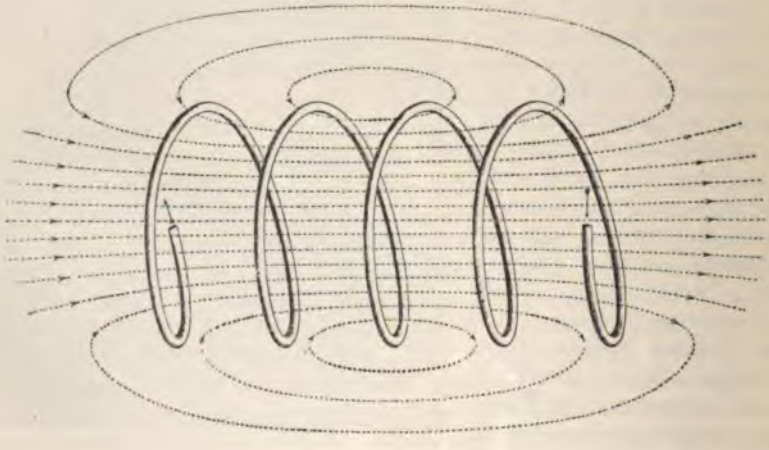
ganz ebenso magnetische Kräfte ausübt wie ein Magnet. Wenn das der Fall ist, so muß man auch mittels Eisenfeile die magnetischen Kraftlinien eines Stromes erhalten können, wie man sie bei einem Magnetstab erhält. Das ist in der Tat möglich. Wenn man in Fig. 151 einen geradlinigen Draht durch die Ebene des Papiers senkrecht hindurchsteckt und einen starken Strom durch ihn hindurchsendet, so ordnen sich Eisenfeilspäne, die auf das Papier gestreut sind, so an, wie es die Figur zeigt, d. h. die magnetischen Kraftlinien des Stromes sind Kreise um den Draht herum.

Fig. 152.

Um jedes Stück eines Stromkreises herum sind also die magnetischen Kraftlinien Kreise. Hat man daher einen geschlossenen Kreisstrom, wie Fig. 152, so haben um jeden Teil des Drahtes herum die Kraftlinien die Richtung der kleinen Pfeile, also sie durchschneiden die durch den Stromkreis begrenzte Ebene senkrecht, wie es die großen Pfeile anzeigen, d. h. die Kraftlinien gehen durch die Ebene des Stromkreises senkrecht hindurch.

Nehmen wir weiter eine Drahtspirale, wie Fig. 153, so gehen aus demselben Grunde die Kraftlinien im wesentlichen parallel der Achse der Spirale hindurch. Im Inneren einer stromdurchflossenen Drahtspule ist also ein homogenes Magnetfeld (S. 164) vorhanden. Die Kraftlinien schließen sich außerhalb wieder zu geschlossenen Figuren. Diese Kraftlinien müssen, wie es Kraftlinien immer tun, jedes Stück Eisen, in

Fig. 153.



das sie eindringen, magnetisieren, wie es tatsächlich geschieht. Man nennt häufig eine solche Drahtspirale ein Solenoid (von σωλήν, solen, Windung).

Die Intensität des magnetischen Feldes in einer solchen Spule ist um *so größer*, je mehr Windungen die Spirale auf 1 cm Länge hat und je stärker

der Strom ist, der durch sie fließt. Drückt man die Stromstärke in Ampere aus, so bezeichnet man gewöhnlich das Produkt aus der Zahl der Windungen des Solenoids pro 1 cm Länge und der Stromstärke als die Zahl der Amperewindungen und kann also sagen, die Feldstärke im Inneren eines Solenoids ist um so größer, je größer die Zahl der Amperewindungen ist. Man hat nun absichtlich die Einheiten, in denen man Feldstärken mißt, und die Stromeinheit, 1 Ampere, in solchen Zusammenhang gebracht, daß die magnetische Feldstärke im Inneren einer solchen Spule (die überall, außer in der Nähe der Ränder, dieselbe ist) gerade gleich $\frac{5}{4}$mal der Zahl der Amperewindungen ist (genauer ist der Faktor nicht $\frac{5}{4}$, sondern $\frac{4\pi}{10} = 1{,}2566$). Da wir nun die Zahl der magnetischen Kraftlinien, die wir pro Quadratzentimeter zeichnen, stets gleich der Feldstärke an der betreffenden Stelle machen wollten, so können wir sofort angeben, wie viel Kraftlinien wir in einer solchen Stromspule haben. Hat z. B. die Spule auf jeden Zentimeter Länge 10 Windungen und wird sie von einem Strom von 4 Ampere durchflossen, so ist die Zahl der Amperewindungen 40 und die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter ist 50. Wir haben also durch jeden Quadratzentimeter 50 Kraftlinien zu legen. Die Gesamtzahl der Kraftlinien, die wir so zu zeichnen haben, hängt natürlich von dem Querschnitt der Spule ab. Ist dieser z. B. 6 qcm, so haben wir im ganzen 300 Kraftlinien im Inneren der Spule.

Bringen wir nun in die Spule einen Stab von weichem Eisen, so wird dieses infolge der magnetisierenden Kraft selbst zu einem Magneten, entwickelt also für sich noch besonders Kraftlinien, und die Zahl der Kraftlinien, die jetzt durch die Spule, d. h. durch den Eisenkern hindurchgehen, wird bedeutend größer, weil eben das magnetische Eisen selbst je nach der Stärke seines Magnetismus mehr oder weniger Kraftlinien enthält oder aussendet. Die verschiedenen Eisensorten unterscheiden sich sehr wesentlich darin, in welchem Verhältnis sie die Zahl der Kraftlinien des Solenoids vergrößern. So hat sich z. B. durch Experimente folgender Zusammenhang ergeben für die Zahl der Amperewindungen einer Magnetisierungsspule (also für deren magnetisierende Kraft) einerseits, und andererseits für die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, die dadurch in den betreffenden Eisenkörpern entstehen. Und zwar sind in folgender Tabelle drei Sorten von Eisen enthalten, die man als Schmiedeeisen, Stahlguß und Gußeisen bezeichnet. Außerdem ist die Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule angegeben.

Zahl der Amperewindungen	Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule	Zahl der Kraftlinien pro 1 qcm		
		Schmiedeeisen	Stahlguß	Gußeisen
5	6,25	9000	11000	—
10	12,5	12000	13500	2300
15	18,75	13300	14500	3900
20	25	14400	15000	5000
25	31,25	14900	15500	5600
30	37,5	15300	15800	6200

Man sieht, daß die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, also die Stärke der Magnetisierung, bei gleicher Amperewindungszahl für Stahlguß größer ist als für Schmiedeeisen und für beide bedeutend größer ist als für Gußeisen.

Man bezeichnet das Verhältnis, in welchem die Zahl der Kraftlinien der Spule nach Einbringung des Eisenkerns zu der Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule steht, als die magnetische Leitungsfähigkeit des betreffenden Eisens. Häufig braucht man auch dafür den Ausdruck magnetische Permeabilität.

Wir können aus unseren obigen Zahlen diese Permeabilität für diese drei Eisensorten berechnen. Dadurch erhalten wir folgende Tabelle:

Zahl der Amperewindungen	magnetische Leitungsfähigkeit		
	Schmiedeeisen	Stahlguß	Gußeisen
5	1440	1760	—
10	960	1080	184
15	709	773	208
20	576	600	200
25	477	496	179
30	408	421	165

Man sieht, daß die magnetische Leitungsfähigkeit der verschiedenen Eisensorten nicht eine unveränderliche Größe ist, wie die elektrische Leitungsfähigkeit der Metalle, sondern daß sie um so kleiner wird, je stärker die magnetisierenden Kräfte sind, die auf das Eisen wirken. Der Magnetismus, den Eisenkörper annehmen, wächst also nicht proportional mit der magnetisierenden Kraft, sondern viel langsamer und nähert sich einer Grenze, über die er nicht hinausgeht.

Man kann in demselben Sinne auch von der magnetischen Leitungsfähigkeit anderer Körper als des Eisens sprechen. Für diese, z. B. die Luft oder Kupfer, ist die Leitungsfähigkeit offenbar gleich 1, weil sie eben die Zahl der Kraftlinien nicht vermehren, wenn man sie in die Spule bringt. Nur Nickel und Kobalt haben etwas größere Leitungsfähigkeiten als 1.

Diese Anschauungsweise, die zunächst etwas gezwungen aussieht, wird uns aber nun zu einer wichtigen neuen Auffassung der magnetischen Erscheinungen führen.

Nehmen wir einen geschlossenen Eisenring und umwickeln wir ihn ganz mit Draht. Durch den Draht fließe ein Strom. Dann ist es die Zahl der Amperewindungen, welche die magnetischen Kraftlinien hervorbringt. Je größer die Leitungsfähigkeit des Eisens, je größer der Querschnitt des Ringes, je stärker der Strom ist, und je mehr Windungen auf 1 cm Länge gehen, um so mehr Kraftlinien gehen durch den Ring hindurch. Es gehen aber bei gegebener Gesamtzahl der Windungen um so mehr auf 1 cm Länge, je kleiner die Länge des Ringes (in der Mittellinie gemessen) ist. Man kann daher hier ein ganz analoges Gesetz aufstellen, wie es das Ohmsche Gesetz bei einem elektrischen Strome ist. Bezeichnen wir nämlich die gesamte Zahl der Amperewindungen unseres Ringes, welche ja den Magnetismus erst erzeugt, als die magnetomotorische Kraft (diese Zahl ist wie oben mit $\frac{5}{4}$ zu multiplizieren, um in Übereinstimmung

mit den einmal festgestellten magnetischen Maßen zu sein) und bezeichnen wir diejenige Größe, welche von der Leitungsfähigkeit, dem Querschnitt und der Länge des Ringes abhängt, als den magnetischen Widerstand des Ringes, so können wir sagen: die Zahl der Kraftlinien in unserem Ring ist gleich der magnetomotorischen Kraft dividiert durch den magnetischen Widerstand:

$$\text{Zahl der Kraftlinien} = \frac{\text{magnetomotorische Kraft}}{\text{magnetischer Widerstand}}.$$

Was also im elektrischen Gesetz die Stromstärke ist, das ist hier bei dem magnetischen Gesetz die Zahl der Kraftlinien.

Der magnetische Widerstand eines Ringes verhält sich ganz ebenso wie der elektrische Widerstand eines Drahtes; er ist nämlich um so größer, je größer die Länge des Ringes, je kleiner der Querschnitt und je kleiner die Leitungsfähigkeit (für die betreffende Größe der Amperewindungszahlen genommen) ist:

$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{magnet. Leitungsfähigkeit}}.$$

Ganz ebenso ist der

$$\text{elektrische Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{elektr. Leitungsfähigkeit}}.$$

Zunächst gilt dieses Gesetz des Magnetismus nur für einen geschlossenen Eisenring, weil nur bei diesem tatsächlich alle Kraftlinien im Inneren des Ringes verlaufen. Man kann aber mit großer Genauigkeit dasselbe Gesetz auch auf nahezu geschlossene magnetische Kreise anwenden, wenn man nur für den magnetischen Widerstand jedesmal die richtigen Werte annimmt. Betrachten wir z. B. in Fig. 154 den Eisenring, welcher an der Stelle S N aufgeschnitten ist, so daß dort eine Luftschicht sich befindet und daß der Ring dort zwei freie Pole hat.

Die Kraftlinien verlaufen in der Luftschicht, wie es die Figur zeigt, im wesentlichen geradlinig zwischen N und S und biegen sich nur wenig nach außen. Sie bauchen sich um so weniger aus, je enger die Luftschicht ist. Wir können nun für diesen Fall den magnetischen Widerstand berechnen, indem wir ihn aus zwei Teilen zusammensetzen. Es ist nämlich

$$\begin{aligned}\text{der ganze magnetische Widerstand} &= \text{magnet. Widerstand des Eisens} \\ &+ \text{magnet. Widerstand der Luft.}\end{aligned}$$

Wir wollen mit bestimmten Zahlen rechnen. Es sei der Querschnitt des Ringes 5 qcm, die Länge des ganzen Ringes (d. h. die Länge der Mittellinie) 60 cm, die Länge der Luftschicht sei 1 cm. Die Leitungsfähigkeit des Eisens sei 1000. Wenn dann der Ring ohne Unterbrechung wäre, so

$$\text{wäre sein magnetischer Widerstand} = \frac{60}{5 \cdot 1000} = 0{,}012.$$

Da er unterbrochen ist, so ist sein

$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{59}{5 \cdot 1000} + \frac{1}{5} = 0{,}0118 + 0{,}2 = 0{,}2118.$$

Man sieht, daß der magnetische Widerstand infolge der vorhandenen Luftschicht etwa 17,7mal so groß geworden ist, so daß die Zahl der Kraft-

linien im zweiten Fall um das 17,7fache abgenommen hat, gegenüber der im ersten Fall.

Nehmen wir weiter den komplizierteren Fall, der in Fig. 155 dargestellt ist. Darin befindet sich innerhalb der Luftschicht wieder ein Stück Eisen A. Wir wollen annehmen, das Eisen A habe die Länge 0,8 cm, jede der beiden Luftschichten die Länge 0,1 cm. Dann ist der

$$\text{magnetische Widerstand} = \frac{59}{5 \,.\, 1000} + \frac{0{,}8}{5 \,.\, 1000} + 2 \,.\, \frac{0{,}1}{5} = 0{,}05196.$$

also mehr als 4mal so groß wie im Falle eines ganz geschlossenen Ringes. Wenn also durch den ganz geschlossenen Eisenring etwa 17 000 Kraftlinien hindurchgehen, so gehen im Falle der Fig. 154 bloß etwa 1000, und im Falle der Fig. 155 etwa 4000 Kraftlinien durch den ganzen Kreis hindurch.

Man kann auch umgekehrt fragen, wie groß in diesen drei Fällen die Zahl der Amperewindungen sein muß, um jedesmal die gleiche

Fig. 154.

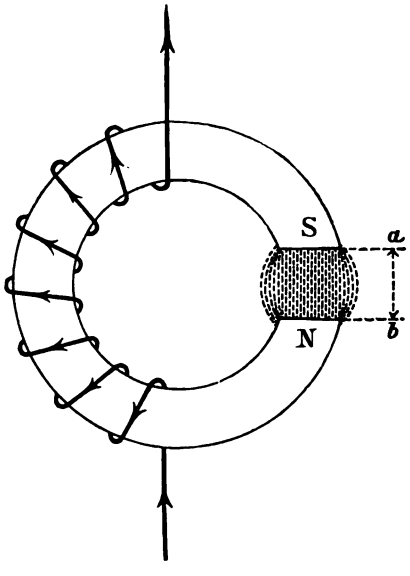
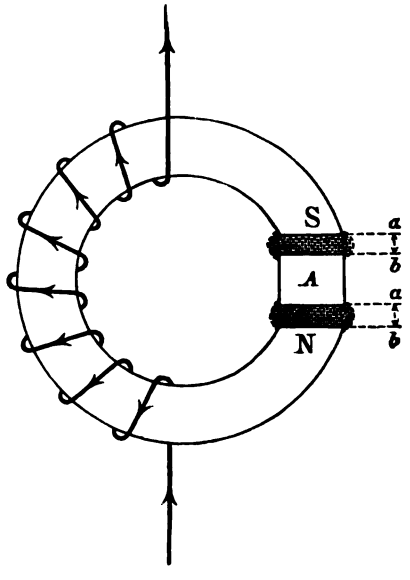


Fig. 155.



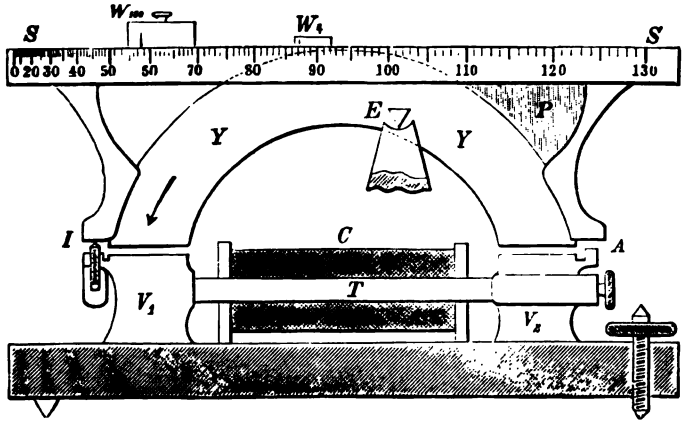
Zahl der Kraftlinien, etwa 17 000, hervorzubringen. Nach dem Ohmschen Gesetz für den Magnetismus braucht man im ersten Fall eine magnetomotorische Kraft von $17\,000 \times 0{,}012 = 204$, welche $\frac{4}{5} \,.\, 204 = 165$ Amperewindungen entspricht, im zweiten Fall ca. 17mal so viel, also etwa 2800, im dritten Fall ca. 4mal so viel, also etwa 800 Amperewindungen. Man sieht, wie stark man die gesamte Zahl der Amperewindungen vergrößern muß, um trotz des Luftspalts die gleiche Stärke der Magnetisierung des Eisens zu erzielen.

Dieses Ohmsche Gesetz für den Magnetismus

wird bei der Berechnung von Dynamomaschinen, wo man es immer mit nahezu geschlossenen Kreisen zu tun hat, allgemein angewendet.

Aus der vollständigen Ähnlichkeit, die der magnetische Widerstand von Eisensorten mit dem elektrischen Widerstand von Drähten hat, ergibt sich nun auch, daß man verschiedene Eisensorten miteinander in Bezug auf ihre magnetische Leitungsfähigkeit (Permeabilität) ganz ähnlich vergleichen kann, wie man verschiedene Drähte auf ihre elektrische Leitfähigkeit vergleicht. Ein naheliegendes Mittel dazu wäre, daß man magnetische Stäbe in derselben Weise anordnet, wie man es bei elektrischen Widerständen in der Wheatstoneschen Brücke tut, und dadurch magnetische Widerstände vergleicht. Indes zeigt sich hier, bei den magnetischen Messungen, doch ein wesentlicher Unterschied gegenüber den elektrischen Messungen. Die Luft nämlich ist bei elektrischen Messungen als ein vollkommener Isolator zu betrachten, ihr Widerstand ist millionenfach größer als der eines gleich langen Metalls.

Fig. 156.

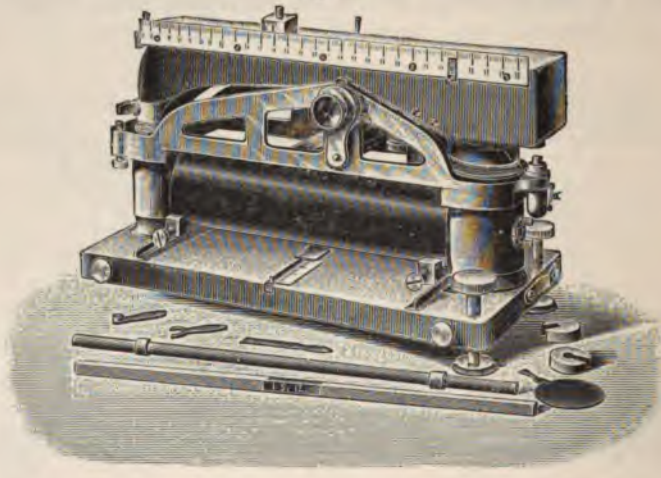


Das ist aber in Bezug auf den Magnetismus nicht der Fall. Das beste magnetische Eisen leitet den Magnetismus nur ca. 3500mal so gut wie die Luft. Wenn daher ein Eisenstück in der Luft sich befindet und man Anordnungen trifft, daß magnetische Kraftlinien in das Eisenstück eindringen, so gehen immer auch Kraftlinien in die umgebende Luft. Das Analogon hätten wir bei der Elektrizität, wenn wir einen Kupferdraht, durch den wir den Strom senden wollen, nicht in der Luft ausspannen, sondern etwa in Quecksilber oder in einer sehr gut leitenden Salzlösung. Dann würde auch immer ein Teil des Stromes durch das Quecksilber oder durch die Salzlösung gehen, welche parallel zum Kupferdraht geschaltet ist, also im Nebenschluß zu ihm liegt. Ganz so liegt bei magnetischen Messungen die Luft immer im Nebenschluß zu den Eisenstäben, und man darf daher ihren Einfluß auf die Messungen nicht vernachlässigen.

Durch geeignete Anordnungen gelingt es aber doch, auf verhältnismäßig bequemem Wege die magnetische Leitungsfähigkeit verschiedener Eisensorten zu bestimmen, und zwar für verschieden große magnetisierende Kräfte, da ja die Leitungsfähigkeit des Eisens von diesen ab-

hängt. Ein für derartige Messungen sehr geeigneter Apparat ist die magnetische Wage von Du Bois, von der Fig. 156 eine schematische Zeichnung und Fig. 157 die Ansicht gibt. Das zu untersuchende Eisen wird in Form eines Stabes von 15 cm Länge und 1 qcm Querschnitt abgedreht und bildet dann — das ist das Prinzip des Instruments — den einen Teil eines vollständigen magnetischen Kreises. Der Eisenstab, in der Figur ist er mit T bezeichnet, wird zu dem Ende zwischen die Eisenbacken V_1 und V_2 geklemmt und befindet sich dabei im Inneren einer Drahtspule C, durch welche Ströme zwischen 0 und 30 Ampere gesendet werden. Über den Backen V_1 und V_2 kann sich ein kreisförmiges eisernes Joch YY mit geringem Spielraum um die Achse E drehen. Die Achse liegt nicht symmetrisch zu dem Joch. Um das Gleichgewicht zu erhalten, ist rechts ein Bleiklotz P als Ausgleich angebracht. Durch die Schraube I

Fig. 157.

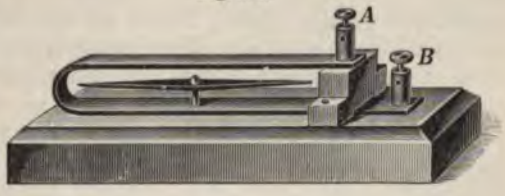


und den Anschlag A ist die Bewegung des Jochs begrenzt. Wenn nun das Joch im Gleichgewicht ist, solange kein Strom durch C fließt, so muß es sich doch sofort nach links, in der Richtung des Pfeiles drehen, wenn ein Strom durchgesendet wird. Dann wird nämlich T mit dem Backen V_1 und V_2 magnetisch und sie ziehen das induzierte Joch an. Obwohl dieses nun symmetrisch induziert wird, so muß es sich doch drehen, weil eben der Drehpunkt exzentrisch, also die Hebelarme ungleich sind. Durch Verschiebung eines Laufgewichtes W_{100} von 100 g Gewicht oder bei kleinen Kräften eines anderen W_4 von 4 g Gewicht kann man nun das Joch wieder zum Einspielen bringen. Das Laufgewicht kompensiert also die magnetische Anziehung. Die magnetische Anziehung ist aber von dem magnetischen Moment des Stabes abhängig. Dadurch ist das magnetische Moment und daher auch die magnetische Leitungsfähigkeit des betreffenden Eisens leicht zu messen.

Die bisher besprochene Magnetisierung von Eisen durch elektrische Ströme ist aber nur eine der magnetischen Wirkungen des galvanischen Stromes.

Wir haben schon häufig provisorisch von den Eigenschaften der Galvanoskope und Galvanometer Gebrauch gemacht, um aus diesend as Vorhandensein und die Stärke eines elektrischen Stromes zu erkennen und zu messen. Oerstedt, Professor in Kopenhagen, war es, welcher zum ersten Male die Beobachtung machte, daß unter dem Einfluß eines elektrischen Stromes, der durch einen Stromkreis fließt, eine in der Nähe befindliche Magnetnadel aus ihrer natürlichen Richtung, der Nord-Südrichtung, die sie unter dem Einfluß des Erdmagnetismus einnimmt, abgelenkt wurde. Führt man durch den kupfernen Bügel in Fig. 158 mittels der beiden Klemmschrauben einen galvanischen Strom, so wird die innerhalb des Bügels befindliche Magnetnadel abgelenkt. Sie wird auch abgelenkt, wenn sie oberhalb und unterhalb oder zur Seite des vom Strome durchflossenen Bügels sich befindet. Dies war die Grundentdeckung von Oerstedt. Die wichtigsten Fragen bei dieser Erscheinung sind nun offenbar die beiden: 1. nach welcher Richtung wird die Magnetnadel durch einen Strom abgelenkt? 2. von welchen Umständen hängt die Größe der Ablenkung ab?

Fig. 158.



Bei jeder Umkehrung der Richtung des Stromes wird auch die Nadelablenkung umgekehrt. Ging der Nordpol der Nadel das eine Mal nach vorn aus dem Bügel heraus, so geht er beim Umkehren des Stromes nach hinten aus dem Bügel heraus. Die Richtung, nach welcher eine Magnetnadel abgelenkt wird, hängt also von der Richtung des Stromes ab, der auf sie wirkt. Nun hat Ampère gefunden, daß hierbei ganz dieselbe Schwimmerregel gilt, welche bei der Magnetisierung von Eisenkörpern gültig war (S. 160). Denkt man sich in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, mit dem Gesicht der Magnetnadel zu, so wird der Nordpol der Magnetnadel nach links abgelenkt.

Die Kraft also, welche der Strom auf eine drehbar befestigte Magnetnadel ausübt, ist eine drehende. Der Strom übt, wie man sagt, ein Drehungsmoment auf die Nadel aus. Dieses Drehungsmoment sucht die Nadel stets senkrecht zu dem Strom zu stellen. Wir wissen (S. 168), daß die magnetischen Kraftlinien einer solchen Stromschleife, wie in Fig. 152, senkrecht zu der Ebene des Stromkreises stehen. Gerade in diese Richtung, in die Richtung der Kraftlinien des Stromes, sucht sich die Magnetnadel einzustellen.

Eine Magnetnadel, die von einem Strome beeinflußt und gedreht wird, steht also unter dem Einfluß zweier Kräfte. Erstens wirkt auf sie der Erdmagnetismus, welcher sie immer in die bestimmte Süd-Nordrichtung zu zwingen sucht. Zweitens wirkt auf sie der Strom, welcher sie aus dieser Richtung abzulenken sucht. Wäre der Erdmagnetismus nicht vorhanden, so würde der schwächste Strom schon die Magnetnadel so drehen, daß sie senkrecht zu der Richtung des Stromes steht. Da der

Erdmagnetismus aber die Nadel in der Nord-Südrichtung zu halten und, wenn sie aus dieser abgelenkt ist, sie in dieselbe zurückzudrehen sucht, so ist die Ablenkung der Nadel aus der Nord-Südrichtung nur so groß, daß die Drehung, die der Erdmagnetismus hervorbringt, und die Drehung, die der Strom herbeiführt. sich das Gleichgewicht halten.

Die Größe der drehenden Kraft, welche von einem Strom auf einen Magneten ausgeübt wird, und überhaupt die Größe der magnetischen Wirkungen eines Stromes hängt, wie experimentelle Untersuchungen gezeigt haben, direkt ab von der Stärke des Stromes. Unter sonst gleichen Umständen übt ein Strom von 2 Ampere Stärke eine doppelt so große magnetische Kraft aus, wie ein Strom von 1 Ampere. Ferner aber hängt die Größe der Kraft auch ab von der Lage und Entfernung des Stromes von dem Magneten. Um das Gesetz dafür aussprechen zu können, können wir uns am einfachsten folgender Vorstellung bedienen. Wir denken uns einen geschlossenen Kreisstrom, in welchem der Strom eine bestimmte Stärke hat. Dieser Stromkreis umschließt eine Fläche von gewisser Größe. Die gesamte Kraft nun, die dieser Stromkreis auf einen Magnetpol ausübt, ist gerade so groß und hat gerade dieselbe Richtung, wie die Kraft, welche ein kurzer Magnetstab ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Kreises hindurchgesteckt gedacht werden kann. Und dabei muß das magnetische Moment dieses gedachten Magnetstabes (oben S. 156) so bemessen sein, daß es gleich dem Produkt aus der Stärke des Stromes und der von ihm umschlossenen Fläche ist. Die Wirkung des Stromkreises ist genau dieselbe, wie die des so konstruierten Magneten. Dieses Gesetz der elektromagnetischen Wirkung eines Stromes nennt man das Biot-Savartsche Gesetz. Dieses läßt sich daher folgendermaßen aussprechen:

Die magnetische Kraft, die ein Stromkreis ausübt, ist gleich der Kraft, welche ein kurzer Magnetstab ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt ist und dessen Moment gleich dem Produkt aus der Stärke des Stromes und der Größe der vom Strom umflossenen Fläche ist.

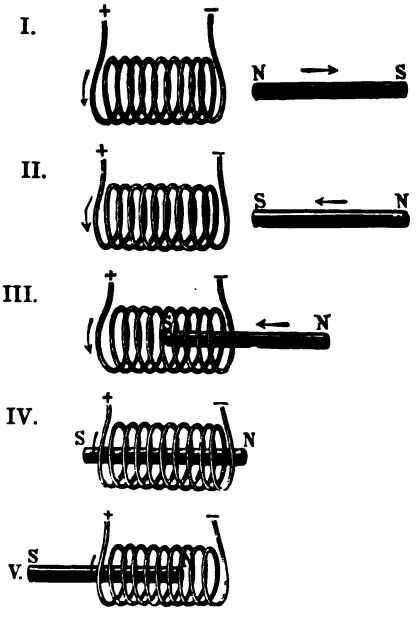
Aus diesem Gesetz folgt sofort, daß eine drehbar aufgehängte Magnetnadel sich senkrecht zu der Fläche des Stromes zu stellen suchen muß. Denn eine Magnetnadel sucht sich in dieselbe Richtung zu stellen, wie der auf sie wirkende Magnet, und der Magnet, der den Strom ersetzt, hat ja seine Achse senkrecht zur Fläche des Stromes.

Bei dieser Fassung des Biot-Savartschen Gesetzes ersetzen wir also einen Strom durch einen Magneten von bestimmtem magnetischen Moment. Da wir nun die magnetischen Momente in bestimmtem Maß ausgedrückt haben, so ist damit nun auch die Einheit der Stromstärke, in der alle Stromstärken gemessen werden sollen, in bestimmter Weise festgesetzt, und die auf diese Weise definierte Einheit nennt man die elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Unsere Stromeinheit, 1 Ampere, ist gerade der zehnte Teil dieser so definierten Einheit und gerade das Biot-Savartsche Gesetz war der Grund, daß diese Einheit *für* die Stromstärke gewählt wurde.

Für einen einfachen geschlossenen Stromkreis können wir nun auch die Zahl der Kraftlinien angeben, welche durch seine Fläche hindurchgelegt werden müssen. Die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter ist ja gleich $\frac{5}{4}$mal der Zahl der Amperewindungen gewesen (oben S. 169). Da wir hier nur eine einzige Windung haben, so gibt die Zahl der Ampere, multipliziert mit $\frac{5}{4}$, direkt die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, und folglich ist die gesamte, durch die Fläche des Stromkreises hindurchgelegte Kraftlinienzahl gleich dem Produkt aus dieser Fläche und der Zahl der Ampere $\left(\text{mal } \frac{5}{4}\right)$, womit auch das Biot-Savartsche Gesetz eine anschauliche Bedeutung erhält.

Aus dieser Auffassung, daß sich ein Stromkreis ganz wie ein Magnet verhält, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises gesteckt ist, daß durch ihn Kraftlinien in bestimmter Menge hindurchgehen, lassen sich nun sämtliche elektromagnetischen Wirkungen leicht erklären. Nur der eine Unterschied herrscht zwischen einem Stromkreis, besonders einer Stromspule und einem Magneten, daß bei dem letzteren eben das Innere unzugänglich ist, während in den Hohlraum der Spule andere Körper hineindringen können.

Fig. 159.



Hatten wir bisher die drehenden Wirkungen betrachtet, die ein Stromkreis auf eine Magnetnadel ausübt, so können wir aus der Analogie sofort vermuten, daß ein solcher Stromkreis auch, wie ein Magnet, Anziehungs- und Abstoßungskräfte auf einen anderen Magneten ausüben wird.

Es lassen sich diese Wirkungen am besten zeigen, wenn man dem Stromkreis die Form einer Spirale gibt.

Wird ein Magnetstab in der Nähe einer festen, von einem Strom durchflossenen Drahtspirale beweglich aufgehängt, so treten zwei Wirkungen ein; erstens nämlich sucht sich der Magnet senkrecht zu der Ebene der einzelnen Spiralkreise zu stellen, d. h. der Magnet stellt sich in der Richtung der Achse der Spirale, zweitens aber, und das ist die Wirkung des Stromes auf den Magneten, die wir jetzt besprechen wollen, wird der Magnet entweder in die Spirale hineingezogen oder von ihr abgestoßen. Die Kraftlinien der Spirale Fig. 159 gehen nämlich durch die Spule hindurch in der Richtung vom +Ende zum −Ende. In der Tat, wenn man sich in dem Strom der Spirale schwimmend denkt, mit dem Gesicht nach

dem Inneren der Spirale zu, so wird nach der Ampèreschen Regel ein Nordpol nach links erzeugt, also an dem —Ende. Von dort aus gehen also die Kraftlinien nach außen und schließen sich durch den Raum so, daß sie dann vom +Ende durch das Innere der Spule gehen. Bei dem Magnetstab S N in der Lage I gehen aber auch die Kraftlinien von N aus nach außen, und diese treffen auf die entgegengesetzt gerichteten der Spule, stauen sich und bewirken, daß der Magnet abgestoßen wird. In Fig. II dagegen treffen die gleichgerichteten Kraftlinien vom —Ende und die in S eintretenden Kraftlinien zusammen; diese suchen sich anzuziehen und der Magnet wird infolgedessen, wie in Fig. II, III, IV zu sehen ist, in die Spule hineingezogen. In der Lage IV stößt das —Ende den Nordpol ebenso ab, wie das +Ende den Südpol, und infolgedessen bleibt der Magnetstab in dieser Lage im Gleichgewicht, und wenn er wie in V durch die Spirale teilweise hindurchgezogen worden ist, so wird er aus demselben Grunde von der Spirale wieder zurückgezogen, bis seine Mitte wieder mit der Spirale zusammenfällt.

Fig. 160.

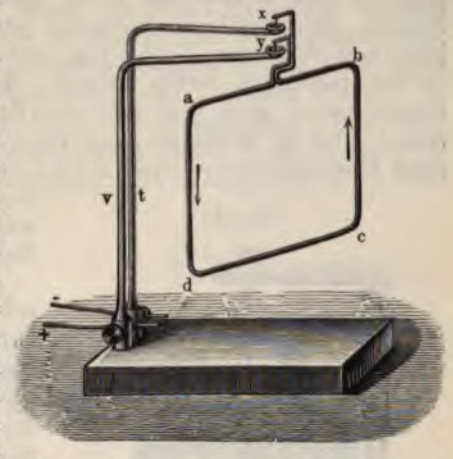
Ist der Stab N S nicht von vornherein ein Magnet, sondern ein Stab aus weichem, unmagnetisiertem Eisen, so wird er infolge der von der Stromspirale ausgehenden Kraftlinien magnetisiert und dann immer in die Spirale hineingezogen. Wenn man also z. B., wie in Fig. 160, eine Rolle R aufstellt, durch die man einen Strom schicken kann, und über dieser einen Stab aus weichem Eisen E an einer Spiralfeder F aufhängt, so wird im Moment des Stromdurchgangs der Eisenkern in die Rolle hineingezogen und bleibt darin, solange der Strom fließt. Sobald der Strom geöffnet wird, also zu fließen aufhört, springt der Eisenstab wieder aus der Rolle heraus. Eine stromdurchflossene Spirale zieht also immer einen Stab aus weichem Eisen in sich hinein. Wir haben von dieser Wirkung schon auf S. 60 Gebrauch gemacht, um ein Meßinstrument für die Stromstärken zu konstruieren.

Umgekehrt muß aber auch, wenn der Stromleiter beweglich und der Magnet fest ist, der Stromleiter sich bewegen und zwar sich ebenfalls so einstellen, daß die Richtung seiner Kraftlinien, die ja senkrecht zu seiner Ebene stehen, parallel der Achse des Magneten wird. Es ist, um diese Behauptung zu bestätigen, die erste Aufgabe, einen Stromkreis herzustellen, der frei beweglich ist, oder von dem wenigstens einzelne Teile frei beweglich sind. Dies wurde von Ampère erreicht durch das nach ihm benannte Ampèresche Gestell. Ampère ließ nämlich den Drahtkreis, dessen Bewegung untersucht werden sollte, mit Spitzen in Näpfchen tauchen, die mit Quecksilber gefüllt waren. Die Näpfchen

waren auf leitenden Trägern befestigt. Die Fig. 161 gibt eine Ansicht eines solchen Ampèreschen Gestells.

Der Strom geht in die beiden metallischen Träger v und t, welche an ihrem oberen Ende Quecksilbernäpfe x und y tragen. In diese wird nun der bewegliche Stromkreis a b c d vermittels Spitzen eingetaucht und kann sich also um diese Spitzen beliebig drehen, wenn er unter dem Einfluß von Kräften steht. Man kann entweder das Stromviereck a b c d in Fig. 161 in das Gestell hängen oder den runden Stromkreis in Fig. 162, oder die Spirale Fig. 163, welche dann ein drehbares Solenoid ist. Sowie man dann einen Magneten in die Nähe eines solchen drehbaren Stromkreises bringt, stellt sich der Stromkreis in eine bestimmte Lage gegen den Magneten, und zwar immer so, daß die Ebene des Stromkreises senkrecht steht gegen die Achse des Magnets, daß also die Achsen des Magnets und des Solenoids in einer Linie liegen.

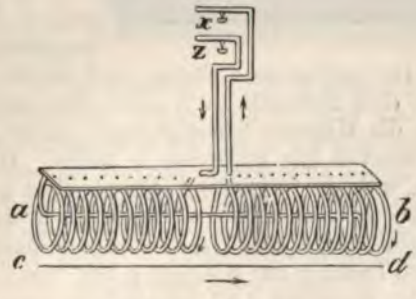
Fig. 161.



Es wird also ein solcher drehbarer Stromkreis durch die Wirkung eines Magnets ganz ebenso gerichtet, wie eine Magnetnadel. Folglich, das kann man sofort schließen, muß auch der Erdmagnetismus auf einen solchen Stromkreis einwirken, ganz ebenso wie er auf eine Magnetnadel einwirkt. Ebenso wie eine Magnetnadel sich von Süden

Fig. 162.

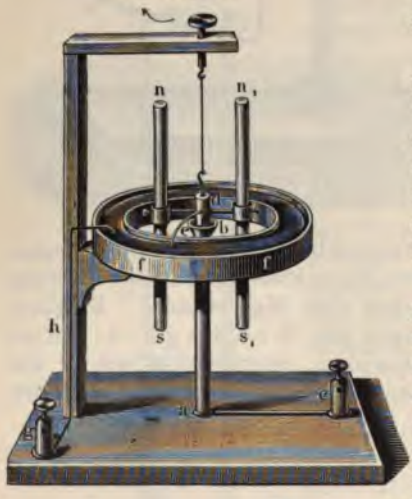
Fig. 163.



nach Norden stellt, in die Richtung des magnetischen Meridians der Erde, ebenso muß sich auch ein drehbarer Stromkreis unter dem Einfluß des Erdmagnetismus mit seiner Achse in die Süd-Nordrichtung stellen. Und dies ist in der Tat der Fall. Ein solcher Stromkreis nimmt, wenn er drehbar aufgehängt ist, von selbst eine ganz bestimmte Stellung ein. Er stellt sich nämlich so, daß seine Achse von Süden nach Norden zeigt, daß also seine Ebene senkrecht steht auf dem magnetischen Meridian.

Wenn man ein von einem Strom durchflossenes Solenoid fest aufstellt und in seine Nähe einen Magneten etwa auf einer Spitze drehbar aufgesetzt bringt, so sucht sich der Magnet also parallel zur Achse des Solenoids zu stellen. Kehrt man nun durch einen Kommutator den Strom im Solenoid um, in dem Moment, wo der Magnet durch seine Ruhelage geht, so muß er sich nun weiter drehen, eine weitere halbe Umdrehung machen, da die Pole des Solenoids jetzt vertauscht sind, und dieses Spiel kann man fortsetzen, wobei man mit der Hand den Kommutator immer zu den passenden Zeiten umlegt. Man kann aber dieses Umlegen des Kommutators auch von dem sich drehenden Magneten selbst besorgen lassen, und so bekommt man dann — allerdings durch Zuhilfenahme eines Kommutators — eine dauernde Rotation eines Magneten in der Nähe eines Stromes, die immer weiter vor sich geht, solange der Strom fließt.

Fig. 164.



Läßt man umgekehrt den Magneten feststehen und stellt ein drehbares Solenoid auf, in dem man durch einen Kommutator den Strom in den passenden Momenten umkehrt, so bekommt man in derselben Weise eine dauernde Rotation eines Stromkreises in der Nähe eines Magneten.

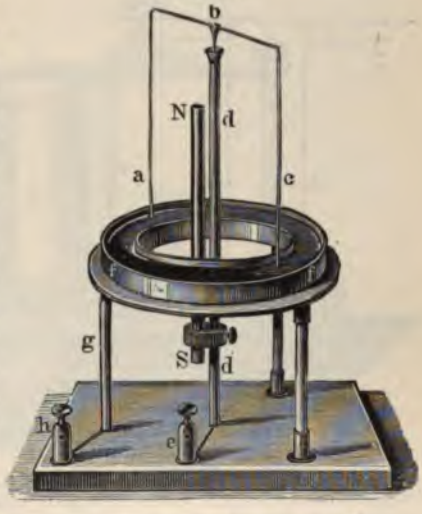
Man kann aber auch durch eine geschickte Kombination von Magneten und Stromkreisen, wie Faraday gezeigt hat, es dahin bringen, daß ein Magnet dauernd um einen elektrischen Strom auch ohne Kommutator herumrotiert. Diese Anordnung sieht man in Fig. 164. Es sind die beiden Magnetstäbe n s und $n_1 s_1$, welche rotieren. Der galvanische Strom wird durch die Klemme c eingeführt und steigt in dem Metallstab a b auf. Ein aufgehängtes Metallstück d, an welchem die Magnete befestigt sind, taucht in das Schälchen mit Quecksilber, welches das Ende von b bildet. Dieses Metallstück d trägt den Draht e, welcher in die mit Quecksilber gefüllte Rinne f f taucht. Es fließt also der Strom von c durch a b in das drehbare Metallstück d und von diesem durch den Draht e in das Quecksilber bei f, von wo aus er durch den Draht h zur Klemme g und von da zum Element zurückgeführt wird. Der Stromteil d e f ist also mit den Magnetstäben beweglich, und es fängt nun, sowie der Strom fließt, das Magnetpaar an, sich zu drehen, und dreht sich so lange, bis der Strom unterbrochen wird. Die Achse der Magnete steht eben hier vertikal und muß vermöge der Anordnung vertikal bleiben, die Kraftlinien aber des Stromkreises a b e h g sind horizontal, also kann der Magnet nie mit seiner Achse parallel den Kraftlinien kommen und muß infolgedessen fortwährend rotieren.

Man kann sich sofort auch durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel überzeugen, daß die Magnete sich drehen müssen, und

auch einsehen, nach welcher Richtung die Rotation stattfinden muß. Denkt man sich nämlich den positiven Strom z. B. in der Richtung c a b fließend, so steht also der Ampèresche Schwimmer in a b aufrecht, und wenn er den Magneten n s ansieht, so muß dessen Südpol nach hinten (zur rechten Hand des Schwimmers), wenn er aber n_1 s_1 ansieht, so muß dessen Südpol nach vorn aus der Ebene der Figur abgelenkt werden, die Ablenkung der Südpole muß also bei beiden nach entgegengesetzten Richtungen gehen. Es greift also an diesem Magnetpaar ein Kräftepaar an, und ein solches Kräftepaar bringt immer eine Rotation hervor.

Diesen Versuch kann man nun aber ebenfalls umkehren, d. h. man kann es bewirken, daß ein stromdurchflossener Draht in kontinuierliche Rotation um einen Magneten herum kommt. Es ist dazu nur nötig, daß ein Teil des Stromkreises beweglich ist, während ein anderer Teil fest ist. Dazu dient eine Einrichtung, wie sie in Fig. 165 gezeichnet ist. In dieser ist ein Teil eines Stromkreises a b c durch die Spitze b beweglich in ein Quecksilbernäpfchen gestellt, so daß er sich um die Achse d d drehen kann. Die Enden des Stromkreises tauchen in die mit Quecksilber gefüllte Rinne f, in welche der Strom von dem Element durch die Klemme h eingeführt wird. Die Drehungsachse d d ist mit der Klemmschraube e verbunden, zu welcher der Leitungsdraht von dem anderen Pole des Elementes in die Quecksilberrinne führt. Nun fließt also der positive Strom z. B. durch h und g, steigt dann zu gleicher Zeit in a und c bis b und geht dann durch die Spitze b und die Metallachse d zur Klemmschraube e und zum Element zurück. Neben der Achse befindet sich ein Metallstab N S. Die Kraftlinien der Stromteile d b a und d b c sind horizontal und bleiben horizontal, die Achse des Magnets dagegen ist vertikal, folglich sucht der Stromleiter sich senkrecht zum Magneten zu stellen und kann daher in keiner Lage zur Ruhe kommen. Der Drahtbügel rotiert also dauernd um den Magnetpol herum. Kehrt man den Magnetstab um, so daß sein Südpol nach oben zeigt, oder kehrt man die Richtung des Stromes in dem Drahtkreis um, so wird natürlich die Richtung der Rotation eine entgegengesetzte.

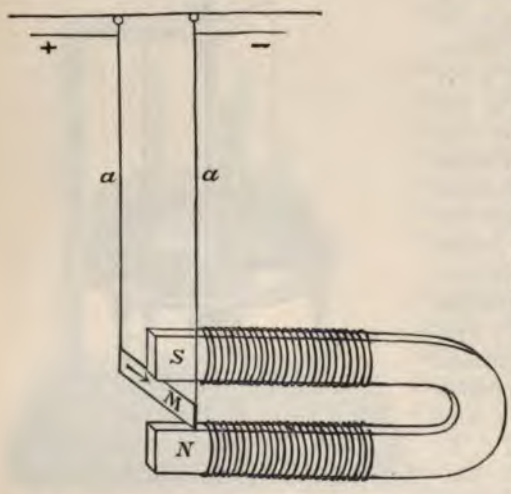
Fig. 165.



Die Richtung dieser Bewegung einzelner Stromteile in einem magnetischen Feld läßt sich immer aus der Ampèreschen Schwimmerregel entnehmen, einfacher aber noch aus einer Regel, bei welcher man die drei Finger der linken Hand, den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger, zu Hilfe nimmt, durch welche man ja drei aufeinander senkrechte Richtungen markieren kann. Wenn man den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der mag-

netischen Kraftlinien des Feldes bringt, den Mittelfinger in die Richtung des Stromes in dem beweglichen Drahtstück, so gibt die Richtung des Daumens immer die Richtung an, nach der das Drahtstück sich bewegt. Diese Regel nennt man die Linke-Hand-Regel. Wir wollen mit dieser z. B. die Rotation des Drahtbügels in Fig. 165 untersuchen. Vom Nordpol N des Magneten gehen die Kraftlinien nach oben, also haben wir den Zeigefinger nach oben zu halten. Wenn der Strom im Draht c b von der Quecksilberrinne nach b fließt, so haben wir den Mittelfinger oben auf der rechten Seite des Bügels nach b hin zu halten, folglich geht der Daumen nach hinten. Der rechte Teil des Bügels bewegt sich also nach hinten. Auf der linken Seite geht der Strom von a nach b, der Mittelfinger ist in dieser Richtung zu halten; der Daumen geht dann nach vorn, also bewegt sich die linke Hälfte des Drahtbügels nach vorn, d. h. der ganze Drahtbügel bewegt sich dabei im umgekehrten Uhrzeigersinn. Wird die Richtung des Stromes oder die der magnetischen Kraftlinien umgekehrt, so wird jedesmal auch die Richtung der Rotation umgekehrt.

Fig. 166.

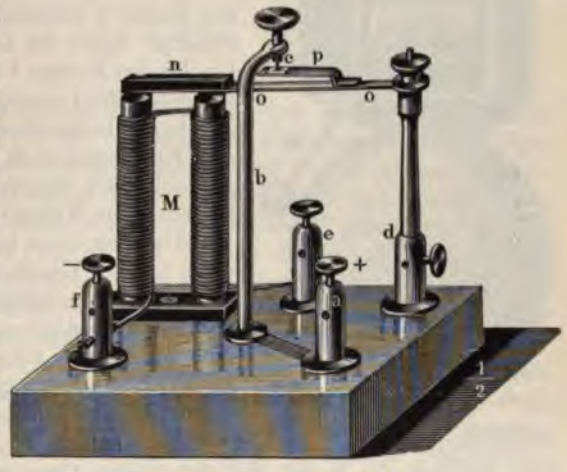


Ein anderer, sehr übersichtlicher Fall der Bewegung eines Drahtstückes in einem magnetischen Felde ist durch Fig. 166 gegeben. Ein hufeisenförmiger Elektromagnet N S liegt horizontal da, so daß die Kraftlinien vom Nordpol N ausgehen und durch die Luft nach oben zum Südpol hin sich strecken. Der Zeigefinger ist also dabei nach oben zu halten. Zwischen den Schenkeln des Magneten ist ein dicker Metallstreifen M angebracht, der an zwei langen weichen Drähten a a hängt. Durch die Drähte und den Metallstreifen wird ein starker Strom gesendet. Fließt dieser durch den Metallstreifen von hinten in der Figur nach vorn, so ist der Mittelfinger in diese Richtung zu halten, folglich muß der Streifen in der Richtung des Daumens, also nach links aus dem Magnetfelde herausgetrieben werden. In der Tat sieht man, sobald man den Elektromagneten erregt, den Streifen M aus dem magnetischen Felde herausfliegen.

Die elektromagnetischen Wirkungen aller Art haben nun sehr weitgehende Anwendungen gefunden, sowohl in technischer als in wissenschaftlicher Hinsicht. Hier sei zunächst eine auch für wissenschaftliche Zwecke wichtige Anwendung erwähnt. Die Magnetisierung nämlich von weichem Eisen durch einen herumgeleiteten Strom kann man dazu benutzen, um eine rasch schwingende, hin und her gehende Bewegung zu er-

zeugen; diese Anordnung hat ein Frankfurter Arzt Neef getroffen und sie wird nach ihm Neefscher Hammer genannt. Die Wirksamkeit dieses Apparates beruht darauf, daß ein Strom um ein Stück weichen Eisens herumgeführt wird, dieses also, wenn er fließt, magnetisch macht. Der Magnet zieht dann einen Anker an; dadurch aber wird vermittels einer passenden Vorrichtung der Strom unterbrochen und infolgedessen der Anker von dem Magneten wieder losgelassen, wodurch der Strom wieder geschlossen wird, und der Vorgang von neuem beginnt. Die Einrichtung eines solchen Hammers ist in Fig. 167 gezeichnet. Die Pole eines Elementes werden mit den Klemmen a und f verbunden, während zwischen d und e ein beliebiger Apparat oder Draht eingeschaltet wird. Dann geht der Strom durch die Metallsäule b zu der Platinspitze c, welche auf die Feder p drückt, so daß der Strom durch diese Feder zu o und d kommt und von dort durch den eingeschalteten Apparat nach e gelangt. Von e aus geht er durch die Windungen des Elektromagnets M nach f und von dort zum Element zurück. Wenn der Strom um den Elektromagneten fließt, wird dieser magnetisch und zieht den Anker n an. Dieser ist mit der Feder o und p verbunden, so daß zu gleicher Zeit die Feder p von der Platinspitze c weggezogen wird. Dadurch ist nun aber der Strom unterbrochen, folglich auch der Elektromagnet nicht mehr magnetisch. Infolgedessen wird n durch die Feder wieder in die Höhe geschnellt und die Verbindung mit c wieder hergestellt und nun beginnt das Spiel von neuem. Es wird also durch diesen Apparat eine schwingende Bewegung der Feder o p und dadurch auch von selbst eine fortwährende Schließung und Unterbrechung des hindurchgeschickten Stromes bewirkt. Die Geschwindigkeit, mit der die Feder schwingt, mit der also auch der Strom unterbrochen und geschlossen wird, hängt von der Länge und der Elastizität der Feder ab.

Fig. 167.



Eine direkte Anwendung wird von dem Neefschen Hammer bei den elektrischen Klingeln gemacht. Man braucht offenbar nur an dem hin und her schwingenden Anker einen Klöppel zu befestigen, der auf eine Glocke schlagen kann, und die elektrische Klingel ist fertig. In der Tat zeigt Fig. 168 eine derartige einfache Klingel (Viktoriawecker von Mix & Genest in Berlin). Man sieht den Elektromagneten E E mit seinem Anker A, der mit dem Klöppelstiel K aus einem Stück verfertigt ist. An dem Anker sieht man die federnde Platte, die Unterbrecherfeder, die sich an die Kontaktspitze S anlegen oder von

ihr trennen kann. Der Strom wird von einem Element durch die beiden Klemmen m und n der Klingel zugeführt, geht von m zum Elektromagneten, von diesem zur Kontaktspitze und durch die Unterbrecherfeder nach n. Dadurch kommt der Anker, wie erklärt, in schwingende Bewegung, der Klöppel schlägt an die Glocke. Ist die Leitung vom Element nach den Klemmen des Weckers unterbrochen, so funktioniert die Klingel natürlich nicht. Um die Leitung vom Element zur Klingel beliebig, etwa von einem Zimmer aus, zu schließen oder zu unterbrechen, werden bekanntlich Kontaktknöpfe benutzt, deren äußere Ansicht in Fig. 169, deren Einrichtung durch Fig. 170 dargestellt ist. Der eine Draht, der vom Element in das Zimmer führt, ist mit der Feder f verbunden, und von der anderen Feder f^1 führt die Leitung weiter zur Klingel. Die beiden Federn f und f^1 sind für gewöhnlich getrennt, die Leitung vom Element zur Klingel ist also unterbrochen. Durch einen Druck auf den Elfenbeinknopf c wird aber f an f^1 angedrückt, der Strom geht durch f und f^1 vom Element zur Klingel und diese funktioniert.

Fig. 168.

Um von einer beliebigen Anzahl von Zimmern aus die Glocke ertönen lassen zu können, muß in jedem derselben ein solcher Kontaktknopf vorhanden sein, und zwar werden diese Kontakte alle parallel geschaltet. Es wird nämlich, wie Fig. 171 zeigt, von der Batterie Z K der eine Pol Z mit der Klingel W verbunden und von der anderen Klemme der Klingel sowohl, wie von dem anderen Pol K der Batterie führen zwei getrennte Drähte bei sämtlichen Zimmern des Hauses vorbei, von denen aus geschellt werden soll. In jedem Zimmer, z. B. in D_1, werden zwei Drähte von dieser Leitung abgezweigt, von jedem Draht einer, welche zu dem Druckknopf D_1 mit seinem beweglichen Kontakt a_1 geführt werden. Dasselbe geschieht im Zimmer D_2 und im Zimmer D_3 u. s. f. Wird also z. B. in D_3 der Knopf gedrückt, so geht der Strom von Z durch W, a_3, D_3 nach K. Element und Klingel sind also miteinander verbunden und die Glocke tönt.

Fig. 169.

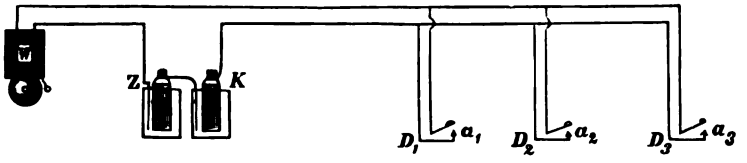
Fig. 170.

Eine weitere praktische Anwendung der elektromagnetischen Erscheinungen bilden die elektrischen Motoren, Elektromotoren, bei welchen Ströme unter dem Einfluß von Magneten oder Magnete unter dem Einfluß von Strömen rotieren und in den Stand gesetzt werden, ihre Rotation auf andere Maschinen zu übertragen und dadurch Arbeit zu

leisten. Diese technisch wichtigen Anwendungen werden wir aber erst im zweiten Teil dieses Werkes behandeln.

In wissenschaftlicher Hinsicht aber haben die elektromagnetischen Wirkungen ihre ausgedehnteste Anwendung gefunden bei der Konstruktion von Galvanometern. Da nämlich die elektromagnetischen Kräfte immer um so stärker sind, je größer die Stromstärke ist, so kann man aus den Wirkungen dieser Kräfte direkt auf die Stromstärke schließen. Und zwar sind alle die verschiedenen Erscheinungen des Elektromagnetis-

Fig. 171.



mus dazu benutzt worden, sowohl die Drehung von Magnetnadeln unter dem Einfluß von Strömen, wie die Drehung von Strömen unter dem Einfluß von Magneten, wie endlich die Hineinziehung von Magneten in Solenoide. Dabei wird die Konstruktion dieser Galvanometer eine verschiedene, je nachdem sie dazu dienen sollen, starke oder mittlere oder ganz schwache Ströme zu messen. Als starke Ströme werden dabei solche anzusehen sein, welche nach Ampere rechnen, also mindestens 1 Ampere betragen, sonst aber beliebig stark sein können. Als mittelstarke Ströme können wir solche rechnen, die herabgehen bis zu ein zehntausendstel Ampere ($^1/_{10}$ Milliampere). Die ganz schwachen Ströme liegen also unterhalb dieser Grenze und man kann sie noch bis zu der Stärke von etwa dem hunderttausendmillionsten Teil eines Ampere (10^{-11} Ampere) messen.

Sehr bequem und leicht ist jetzt die Messung von starken und mittelstarken Strömen. Das sind Ströme, wie sie bei den meisten Meßmethoden und bei den technischen Anwendungen vorkommen und gerade deshalb hat die Technik die Meßinstrumente für sie in eine möglichst einfache und praktische Form gebracht. Zugleich werden diese Apparate mit solcher Genauigkeit konstruiert, daß man auch für wissenschaftliche Zwecke sie jetzt allgemein anwendet.

Hauptsächlich sind für alle Galvanometer zwei magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes in Benutzung. Die eine Konstruktion besteht darin, daß man eine Magnetnadel durch den Strom aus ihrer natürlichen Nord-Südrichtung ablenken läßt. Die Größe dieser Ablenkung ist ein Maß für die untersuchte Stromstärke. Man bezeichnet Galvanometer dieser Art als Nadelgalvanometer. Die zweite Methode besteht darin, daß man den zu untersuchenden Strom selbst durch eine feine Drahtrolle gehen läßt, die unter der Wirkung eines starken Magneten steht und sich in dem beweglichen Feld dreht. Galvanometer dieser Art nennt man Spulengalvanometer oder auch Galvanometer nach Deprez, weil von Deprez zuerst diese Form angegeben wurde.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Arten von

Galvanometern ist sofort ersichtlich. Bei den Nadelgalvanometern steht die bewegliche Nadel erstens unter dem Einfluß des zu untersuchenden Stromes und zweitens unter dem Einfluß der magnetischen Kraft der Erde. Diese letztere aber ist zunächst in ihrer Größe gewissen Schwankungen unterworfen. Zweitens aber wird die Nadel beeinflußt von allen magnetischen Körpern in der Nähe, also von allen ruhenden oder bewegten Eisenmassen, da diese immer magnetisch sind. Ferner aber noch von allen magnetischen Wirkungen, die von starken in der Nähe befindlichen Strömen ausgehen. Und solche Ströme sind jetzt in großen Städten fast überall vorhanden, da die Leitungen für elektrisches Licht und für elektrische Trambahnen solche Ströme führen. Bei den elektrischen Trambahnen kommt noch ein besonders störender Umstand dazu. Bei diesen fließt zwar ein Strom durch die über den Schienen gespannte Oberleitung, also in fester Bahn, er fließt aber zurück durch die Schienen und verbreitet sich von diesen aus in wechselnden Bahnen durch den mehr oder minder feuchten Boden. Solche Erdströme beeinflussen auch die Nadeln von Nadelgalvanometern.

Im Gegensatz dazu ist in den Spulengalvanometern ein von einem starken Magneten gebildetes magnetisches Feld vorhanden, welches so stark ist, daß die Wirkungen der Erde oder von Eisenmassen oder von starken in der Nähe vorbeifließenden Strömen gar nicht dagegen in Betracht kommt.

Wenn daher die Spulengalvanometer ebenso empfindlich gemacht werden könnten wie die Nadelgalvanometer und keine sonstigen Nachteile diesen gegenüber hätten, so wären sie durchaus den ersteren vorzuziehen. Das ist aber doch nicht immer der Fall und deswegen sind beide Arten von Galvanometern noch im Gebrauch, obwohl die Spulengalvanometer jetzt schon in den meisten Fällen die Nadelgalvanometer aus dem Felde geschlagen haben. Für starke und mittelstarke Ströme werden hauptsächlich Spulengalvanometer zu Meßzwecken konstruiert, insbesondere, weil man diese so einrichten kann, daß man ohne lange Rechnung die Stromstärke direkt ablesen kann. Denn da bei ihnen die Ausschläge der Spule unabhängig von äußeren Einflüssen und die Drehungen der beweglichen Rolle nahe proportional der Stromstärke sind, so kann man solche Galvanometer mit einer Skala versehen, die man direkt in Ampere teilen kann. Man nennt solche Apparate, welche direkt ohne Rechnung die Stromstärke in Ampere abzulesen gestatten, Amperemeter. Man kann aber weiter jedes Galvanometer, indem man es in den Nebenschluß legt (S. 100), dazu benutzen, um die Spannung an seinen Enden zu bestimmen. Ist bei solchen Instrumenten, die man im Nebenschluß anwendet, die Skala gleich in Volt geteilt, so nennt man sie Voltmeter.

Solche Präzisions-Volt- und Amperemeter werden von Siemens & Halske nach dem Deprezschen Prinzip in folgender Form ausgeführt: Ein flacher, kräftiger Magnetstab ist so umgebogen, daß seine beiden Pole einander gegenüberstehen. Fig. 172 zeigt die eine (rechte) Hälfte eines solchen Magnetstabs, die linke Hälfte, die ebenso gebildet ist, ist fortgelassen. Die beiden Pole des Magneten sind mit massiven Polschuhen P versehen (von denen wieder bloß der rechte sichtbar ist), die halbzylindrisch ausgeschnitten sind, so daß sie zwischen

sich einen zylinderförmigen Raum zur Aufnahme der beweglichen Spule freilassen. In diesem Raum steht aber zunächst ein eiserner Hohlzylinder, der nur einen Zwischenraum von 2 mm Breite zwischen sich und den Wandungen der Polschuhe läßt. Da der Hohlzylinder magnetisch induziert wird, so entsteht in dem ringförmigen Zwischenraum ein sehr starkes magnetisches Feld. In diesem kann sich nun die bewegliche Spule drehen. Diese ist aus dünnem Draht, auf einen leichten Kupferrahmen gewickelt, der Rahmen selbst hat eine Achse, die oben und unten auf Edelsteinen gelagert ist. Die Achse trägt einen langen Zeiger Z, der auf einer Skala spielt. Die Achse ist nun durch zwei flache Spiralfedern oben an dem Gehäuse befestigt, so daß, wenn sie sich dreht, die Federn aufgewunden werden, und zwar so lange, bis ihre Torsionskraft der Kraft, mit der die Spule gedreht wird, das Gleichgewicht hält. Die Federn dienen zugleich zur Zuführung des Stromes in die Spule. Geht also ein Strom durch die Spule, so sucht die Spule sich so einzustellen, daß die Ebene ihrer Windungen senkrecht zu den Kraftlinien steht (s. S. 178). Die Torsion der Spiralen stemmt sich dieser Bewegung entgegen, und so kommt die Spule je nach ihrer Stromstärke in bestimmter Lage zur Ruhe. Die Anordnung des magnetischen Feldes und der Spule bewirkt, daß die Ausschläge des Zeigers direkt den angewendeten Stromstärken proportional sind. Diese Instrumente, deren äußere Ansicht Fig. 173 zeigt, werden gewöhnlich so eingerichtet, daß jeder Grad der Skala einem Milliampere oder einem zehntel Milliampere entspricht. Hat das Galvanometer, wie das in der Figur gezeichnete, 1 Ohm Widerstand, so gibt, wenn es im Nebenschluß gebraucht wird, jeder Grad eine Spannung von 0,001 Volt an. Da die Skala in 150 Grade geteilt ist, so geht der Meßbereich des Instrumentes für sich als Voltmeter von 0,001 bis 0,15 Volt. Durch Vorschaltwiderstände bei der Benutzung im Nebenschluß kann man den Meßbereich, wie auf S. 101 besprochen wurde, bis 1500 Volt erhöhen. Ebenso mißt das Instrument als Amperemeter

Fig. 172.

Fig. 173.

direkt Stromstärken von 0,001 bis 0,15 Ampere. Mit Nebenschlüssen von geringem Widerstand, bis zu $^1/_{19999}$ Ohm, kann man (nach S. 103) den Meßbereich bis auf 3000 Ampere erhöhen. Manchmal werden diese Nebenschlüsse gleich direkt zwischen den Klemmen des Instrumentes fest angebracht und dann wird die Teilung des Instrumentes gleich in Ampere ausgeführt.

Um die Skala eines solchen Instrumentes richtig herzustellen oder um sie später zu kontrollieren, muß man einen Strom durch den Apparat gehen lassen, dessen Stärke man zugleich mit einem Voltameter (S. 138 f.) bestimmt.

Wenn es sich aber darum handelt, sehr schwache Ströme, solche von weniger als $^1/_{10}$ Milliampere zu messen, so kann man nicht mehr direkt zeigende Instrumente anwenden. Vielmehr werden dazu stets sogenannte Spiegelgalvanometer benutzt. Man befestigt nämlich bei den Nadelgalvanometern an der beweglichen Nadel und bei den Spulengalvanometern an der beweglichen Spule einen Spiegel und mißt die Drehungen der Nadel oder Spule, indem man eine entfernte Skala sich in dem Spiegel spiegeln läßt. Jeder kleinen Drehung des Spiegels entspricht dann eine gewisse Ablenkung des Skalenbildes, das man durch ein Fernrohr beobachtet.

Um mit Nadelgalvanometern schwache Ströme messen zu können, muß man den Strom in vielen Windungen sehr eng um die Nadel herumführen, wodurch, da jede Windung eine drehende Kraft auf die Nadel ausübt, die Gesamtwirkung sehr vergrößert wird. Man nennt solche Apparate Multiplikatoren. Man benutzt bei solchen Galvanometern immer nur sehr kleine Drehungen der Nadel, und diese sind nach einem allgemeinen Gesetz der Physik den wirkenden Kräften, also hier der Stromstärke, proportional, und man mißt, wie gesagt, diese Drehungen durch einen Spiegel, eine Skala und ein Fernrohr. Die Skala befindet sich dicht unter dem Fernrohr in ungefähr derselben Höhe wie der Spiegel, und zwar in beliebigem Abstand von ihm, gewöhnlich zwischen 1 und 3 m. Die kleinsten Ablenkungen der Nadel zeigen sich dadurch schon durch große Ablenkung der Teilstriche der Skala im Spiegel an.

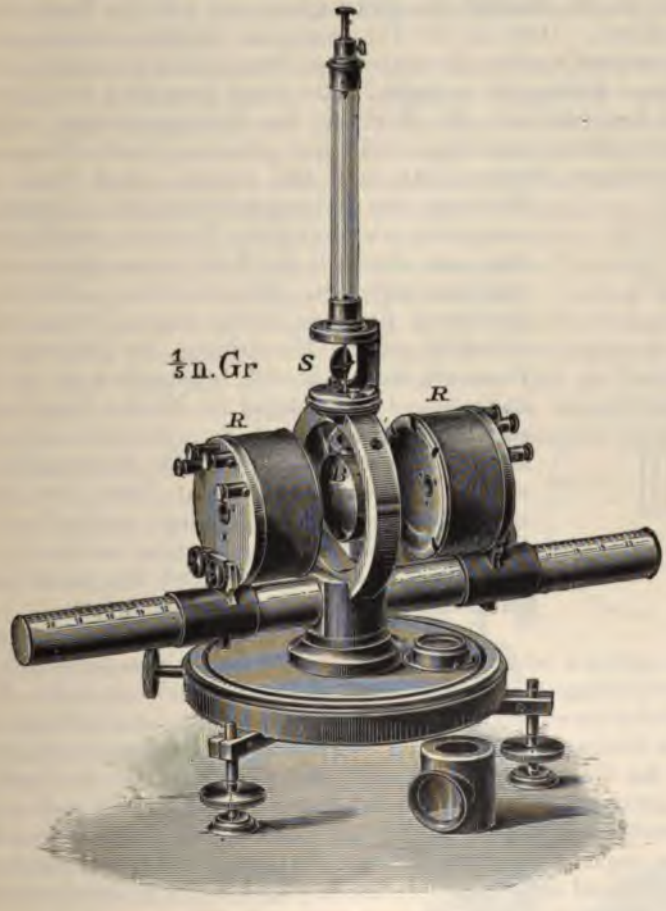
Man hat gewöhnlich für jedes Galvanometer verschiedene Rollenpaare, um größere oder geringere Widerstände und mehr oder weniger Umwindungen zur Verfügung zu haben, und es wird häufig die Einrichtung so getroffen, daß die Rollen in verschiedenen Entfernungen von der Magnetnadel festgestellt werden können.

Die Ansicht eines solchen Galvanometers mit verschiebbaren Rollen, eines Wiedemannschen Spiegelgalvanometers neuerer Form von Hartmann & Braun, gibt Fig. 174. In der Glasröhre hängt ein Kokonfaden, der oben befestigt ist und an den unten ein Spiegelchen S angehängt ist, das man in der Figur frei sieht. An dem Spiegel hängt dann weiter unten ein kleiner ringförmiger Magnet, der in der Figur nicht sichtbar ist, sondern der sich in der Höhlung einer kupfernen Büchse B befindet. Zu beiden Seiten dieser Kupferbüchse befinden sich, auf einem Metallrohr mit Teilung verschiebbar, zwei Drahtrollen R R, die dicht an die Kupferbüchse herangeschoben oder auch von ihr entfernt gehalten werden können. Das kleine, rechts unten besonders ab-

gebildete Gehäuse mit Glasfenster wird über den Spiegel geschoben, um Luftströmungen zu verhindern. Man beobachtet die Drehungen des Spiegels durch das Fenster vermittels Fernrohr und Skala.

Sehr lästig ist bei derartigen Messungen das langsame Schwingen des Magneten um seine jeweilige Gleichgewichtslage herum. Man bringt infolgedessen Vorrichtungen an, um die Schwingungen zu d ä m p f e n,

Fig. 174.



d. h. um zu bewirken, daß der Magnet sofort ohne viele Schwingungen in seine neue Lage übergeht. Dies wird gewöhnlich, wie gerade bei dem eben beschriebenen Instrument, dadurch erreicht, daß man den Magneten in einer ihn sehr eng umschließenden Hülle aus Kupfer schwingen läßt. Es entstehen dann, wie wir im 9. Kapitel sehen werden, Induktionsströme, welche die Bewegung des Magneten sehr rasch dämpfen. Die größten Erfolge in dieser Beziehung erreicht man, wenn man dem Magneten zugleich eine passende Form gibt. Dies geschieht durch den von

Siemens eingeführten Glockenmagneten. Der Magnet hat dann die Form eines an zwei diametral gegenüberliegenden Seiten aufgeschlitzten Fingerhutes. Dieser Magnet befindet sich mit ganz engem Spielraum in einer Kupferkugel, wie Fig. 175 es zeigt. Die Dämpfung ist dadurch eine so rapide, daß der Magnet fast gar keine Schwingungen macht, sondern sich direkt in seine Gleichgewichtslage einstellt. Man nennt Galvanometer dieser Art aperiodische Galvanometer.

Von der größten Bedeutung für die Empfindlichkeit eines Galvanometers ist es, den Einfluß des Erdmagnetismus auf die Nadel möglichst abzuschwächen. Denn in der Tat, wenn der Erdmagnetismus gar nicht wirkte, so würde ja schon der schwächste Strom die Magnetnadel senkrecht zu der Ebene stellen, die er umfließt, also einen Ausschlag von 90° hervorbringen. Je mehr also die Wirkung des Erdmagnetismus aufgehoben wird, desto größere Ausschläge erhält man schon bei kleinen Stromstärken, desto schwächere Ströme kann man also messen. Man kann nun die Wirkung des Erdmagnetismus auf doppelte Weise schwächen oder aufheben. Zunächst nämlich dadurch, daß man oberhalb der Nadel einen Magnetstab verschiebbar anbringt. Gibt man diesem Stab diejenige Richtung, daß sein Nordpol nach Norden zeigt, so schwächt er die Einwirkung des Erdmagnetismus. Denn die Erde läßt sich bekanntlich als ein Magnet auffassen, dessen Südpol im Norden liegt (weswegen eben Magnetnadeln mit dem Nordpol nach Norden zeigen). Ein solcher Magnetstab, den man den Astasierungsmagneten nennt, kann dem Galvanometermagnete beliebig genähert werden und so die Einwirkung des Erdmagnetismus mehr oder minder schwächen, so daß man dadurch fast jeden beliebigen Grad der Astasie hervorbringen kann.

Fig. 175.

Je stärker die Astasierung eines Galvanometers ist, desto geringer ist also die Kraft, welche die Galvanometernadel in die Gleichgewichtslage (die Nordsüdrichtung) zurückzuziehen sucht. Wird daher die Nadel durch den Strom abgelenkt, so werden die Schwingungen, die sie um die Gleichgewichtslage herum ausführt, immer langsamer, je stärker astasiert das Galvanometer ist, eben weil die Kräfte, die die Nadel beeinflussen, geringere sind. Mit der Erhöhung der Astasie ist also bei jedem Galvanometer eine Vergrößerung der Schwingungsdauer verbunden, so daß man sogar umgekehrt aus der Angabe der Schwingungsdauer der Magnetnadel auf den Grad der Astasierung bei einem und demselben Instrument schließen kann. So sagt man, ein Galvanometer sei astasiert bis auf 6 Sekunden oder 20 Sekunden Schwingungsdauer.

Ein zweites Mittel, um die Einwirkung des Erdmagnetismus möglichst zu verringern, besteht darin, daß man in dem Galvanometer nicht einen Magneten (Nadel-, Ring-, Glockenmagneten), sondern zwei entgegengesetzt liegende Magnete fest miteinander verbunden drehbar aufhängt. Ein solches Magnetpaar nennt man ein astatisches Nadelpaar und ein Galvanometer, das ein solches enthält, ein astatisches Galvanometer. Solche wurden zuerst von Sir

W. Thomson konstruiert und heißen deshalb Thomson-Galvanometer. Da man aber zwei solche Magnete nicht ganz genau gleich machen kann, so benutzt man immer noch einen außerhalb angebrachten Astasierungsmagneten dazu. Indem man bei diesen Instrumenten die Magnetsysteme nicht an Kokonfäden, sondern an Quarzfäden aufhängt, erzielt man eine außerordentlich große Empfindlichkeit des Instrumentes. In der Tat sind die Thomson-Galvanometer die empfindlichsten Instrumente, die man bisher konstruiert hat. Man kann mit ihnen noch Ströme messen, die bloß den hunderttausendmillionsten Teil eines Ampere (10^{-11} Ampere) an Stärke besitzen.

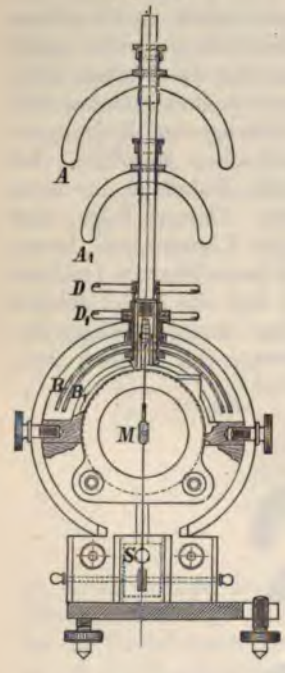
Diese feinen Instrumente waren aber mit dem Fortschreiten der Anwendung der Elektrizität in den Städten allmählich unbrauchbar geworden, oder wenigstens war ihre hohe Empfindlichkeit nicht mehr auszunutzen. Die Astasierung nämlich, durch welche die Nadeln dem Einfluß des Erdmagnetismus entzogen sind, bewirkt ja andererseits, daß die Nadeln keine sichere Ruhelage mehr haben. Solange der Erdmagnetismus wirkt, stellt sich jede Nadel in den magnetischen Meridian. Ist der Erdmagnetismus ohne Einfluß, so ist eine solche Ruhelage nur noch durch die Torsion des Aufhängefadens bestimmt. Daraus folgt, daß die oben erwähnten äußeren Störungen, z. B. bewegte Eisenmassen, ferner Ströme, die in der Erde fließen, weiter Ströme, die in benachbarten Drähten zirkulieren, daß diese alle die Nadel beeinflussen, daß die Nadel solcher Galvanometer mit ihrem Spiegel in fortwährender unregelmäßiger Bewegung ist, so daß Messungen nur in Ausnahmsmomenten möglich sind. Selbstverständlich gibt es immer noch Orte genug, an denen man diese Instrumente benutzen könnte, aber gerade da, wo sie sonst hauptsächlich angewendet wurden, sind sie heute fast nicht mehr brauchbar.

Fig. 176.

Um nun aber doch diese sehr bequemen Instrumente höchster Empfindlichkeit anzuwenden, hat man noch ein Mittel, welches darin besteht, nicht nur das magnetische Feld der Erde, sondern auch andere störende Felder, wie sie aus den erwähnten Ursachen vorkommen, in dem Instrument möglichst klein zu machen. Dies Mittel besteht darin, daß man das Instrument in das Innere eines Eisenkörpers bringt. Eine einzige solche Eisenhülle genügt allerdings nicht, um das äußere Feld möglichst abzuschwächen, man verwendet vielmehr 2 oder 3 solche Eisenhüllen, die durch Luft voneinander getrennt sind. Man bezeichnet dieses Hilfsmittel als Panzerung des Galvanometers. Ein solches Kugelpanzergalvanometer von Rubens

& Dubois wird von Siemens & Halske hergestellt, und dieses ist ein hoch empfindliches und gegen die gewöhnlichen äußeren Störungen fast vollständig geschütztes Nadelgalvanometer. Eine Ansicht desselben gibt Fig. 176. Im Innern einer Kugel aus Stahlguß befindet sich das eigentliche Galvanometer. Dasselbe enthält, wie der Durchschnitt in Fig. 177 zeigt, ein ganz feines Magnetsystem, das sich in dem Hohlraum zwischen zwei enganliegenden Spulen befindet. Die Spulen sind selbst in Stahlgußhüllen (die auch abgenommen werden können) eingeschlossen, und diese stahlgepanzerten Spulen bilden den inneren Panzer des Instruments. Der Spiegel S hängt sehr tief und ist unten durch eine Öffnung sichtbar. Die inneren Astasierungsmagnete werden durch die Griffe $D D_1$ gedreht. Das ganze Galvanometer kann noch in ein Stahlgefäß gebracht werden, welches dann als dritter Panzer wirkt. Sowohl im Innern wie außerhalb des Kugelpanzers sind gebogene Magnetstäbe $A A_1$ und $B B_1$ angebracht, welche gedreht werden können und zur vollständigen Astasierung des Systems dienen.

Fig. 177.



Was man bei Nadelgalvanometern nur auf solche umständliche Weise erreichen kann, die Unabhängigkeit von äußeren Störungen, das leisten die Spulengalvanometer von selbst. Bei diesen wird der fest aufgestellte Magnet, der das Feld erzeugt, in welchem der Strom sich bewegt, sehr stark gewählt, so daß alle Änderungen des Erdmagnetismus, alle in der Nähe befindlichen Ströme u. s. w. gar keinen merklichen Einfluß auf die Stärke des benutzten magnetischen Feldes haben. Dadurch ist also das Instrument sofort vollkommen unabhängig von äußeren Störungen. Der bewegliche Teil besteht also aus einer Drahtrolle, welche in dem magnetischen Feld aufgehängt ist, und welcher nun der zu messende Strom zugeführt wird. Bei dem Deprez-Galvanometer von Edelmann (Fig. 178) sieht man zwei zusammengeschraubte starke Magnete M, einen Hufeisenmagneten darstellend. Zwischen den Polen desselben befindet sich die bewegliche Drahtrolle, die durch einen feinen Metalldraht (in der Röhre L) oben aufgehängt ist und die unten in eine metallische Spiralfeder R ausgeht. Durch den Metalldraht und die Spiralfeder wird der Strom zu- und abgeleitet (bei b und c). Bei K befindet sich der Spiegel. Die Drahtrolle S ist, wie man in der Fig. 179 sieht, die den herausnehmbaren Teil des Instrumentes zeigt, auf einen rechteckigen Rahmen gewunden. Sie besteht aus vollständig unmagnetischem Kupferdraht, und in ihrem Innern befindet sich noch ein fester Eisenzylinder E, um die magnetischen Kraftlinien möglichst auf die Rolle zu konzentrieren. Die Empfindlichkeit dieser Instrumente erreicht beinahe die der Nadelgalvanometer. Der ganze mittlere Teil ist durch einen Glaskasten geschützt. Auf die Güte des Magnetstahls und die Eisen-

freiheit der Kupferdrähte ist bei diesen Instrumenten die größte Sorgfalt zu verwenden.

Solche Deprez-Galvanometer werden von verschiedenen Fabriken nach demselben Prinzip, aber in äußerlich sehr verschiedenen Formen ausgeführt. So zeigt Fig. 180 ein solches, sehr praktisches Galvanometer von Hartmann & Braun. In dem unteren Glasgefäße sieht man den Hufeisenmagneten. Die drehbare Spule ist an feinem Metalldraht in dem Aufsatz aufgehängt und schwebt zwischen den Polen des Hufeisenmagneten.

Fig. 178.

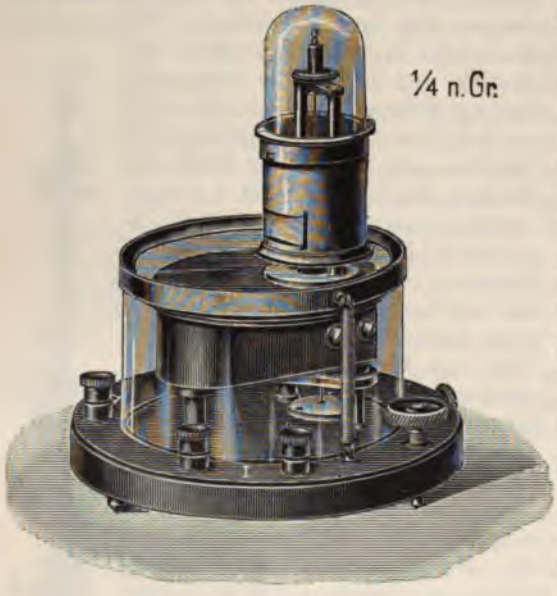
Eine Neuerung ist bei dem Deprez-Galvanometer von Siemens & Halske angebracht, das in Fig. 181 abgebildet ist. Bei diesem steht zunächst das Magnetsystem M, das bei den vorher erwähnten Instrumenten horizontal liegend angeordnet ist, vertikal und umfaßt die bewegliche Spule mit ihrem Eisenkern, die oben an dem Torsionskopf aufgehängt ist. Die Neuerung besteht nun darin, daß an dem Magnetsystem M ein sogenannter „magnetischer Nebenschluß“ N angelegt werden kann. Derselbe besteht aus einem Bügel aus weichem Eisen, welcher mittels einer Schraube ganz oder zum Teil über das Magnetsystem geschoben werden kann. Dadurch wird das magnetische Feld, in welchem sich die Spule befindet, geändert, indem nämlich ein Teil der Kraftlinien des Magneten in diesen Nebenschluß hineingeht. Auf diese Weise kann man die Empfindlichkeit des Instrumentes in gewissen Grenzen ändern, bei dem gezeichneten Instrument bis auf 40 Proz., wodurch man eine gewünschte Empfindlichkeit nach Belieben einstellen kann. Fig. 182 zeigt die drehbare Spule mit dem Eisenkern und der Aufhängeröhre, die in sehr bequemer Weise im ganzen herausgenommen werden können.

Fig. 179.

Bei den Spulengalvanometern bewegt sich die stromführende Drahtrolle in dem engen Hohlraum zwischen den Magnetpolen und dem inneren Eisenkern. Infolgedessen ist ihre Bewegung auch schon von selbst durch die Induktionsströme gedämpft, was man bei dem Nadelgalvanometer erst durch Anbringung eines Kupferdämpfers erreichen muß. Aber diese Dämpfung ist hier sogar so stark, daß sie unter Umständen einen großen Nachteil des Instrumentes hervorbringt. Je stärker das Feld ist, um so größer ist die Dämpfung, die dann bewirkt, daß die bewegliche Spule

ganz langsam, oft erst nach vielen Minuten, in ihre Ruhelage kommt. Wenn man also die Empfindlichkeit des Instrumentes sehr groß machen will, indem man das Feld möglichst stark macht, so hat man zugleich eine höchst unbequeme langsame Einstellung. Man kann auch die Empfindlichkeit statt durch Verstärkung des Feldes, vielmehr dadurch erhöhen, daß man den Aufhängedraht sehr fein macht. Da aber der Aufhängedraht den Strom zuführen muß, so wird dadurch der innere Widerstand des Instrumentes groß. Gewöhnlich gibt man zu der beweglichen Spule noch einen großen Vorschaltwiderstand, der im Instrument fest angebracht ist. Dadurch wird die Dämpfung verringert, aber zugleich auch die Empfindlichkeit, so daß aus diesem Grunde die Nadelgalvanometer immer noch größere Anwendbarkeit besitzen als die Spulengalvanometer.

Fig. 180.



Benutzt man bei allen diesen Galvanometern nur kleine Ablenkungen des beweglichen Teils, die man durch Fernrohr und Skala beobachtet, so kann man dadurch Stromstärken messen, zunächst in willkürlichen Maß, nämlich durch die Anzahl der Skalenteile, die durch die Drehung des Spiegels im Fernrohr durchgewandert sind. Aber man kann die Stromstärke auch sofort in Ampere angeben, wenn man den sogenannten Reduktionsfaktor des Instrumentes kennt. Man bestimmt den Reduktionsfaktor eines Galvanometers dadurch, daß man einen Strom, dessen Stärke in Ampere man kennt (etwa durch ein Voltameter), durch das Galvanometer schickt und den Ausschlag beobachtet.

Will man starke Ströme mit Spiegelgalvanometern messen, so darf man dieselben natürlich nicht direkt durch die Galvanometer gehen lassen, weil die Drähte dieser Galvanometer eben nur für sehr schwache Ströme bestimmt sind und durch starke Ströme verbrennen würden. Man hilft sich dann dadurch, daß man in das Galvanometer nur einen ganz kleinen bekannten Bruchteil des ganzen Stromes schickt. Dies geschieht dadurch, daß man das Galvanometer in eine Zweigleitung bringt, wie Fig. 183 es zeigt. Man sagt dann, das Galvanometer liegt im Nebenschluß. Von E aus geht der Strom, dessen Stärke man messen will. An den Punkten a und b liegt das Galvanometer im Nebenschluß an, das nun die Stärke in seinem Zweige a G b direkt angibt. Kennt man nun noch

den Widerstand des Galvanometers und den Widerstand von a b, so ist die Stromstärke in a b nach unseren Sätzen auf S. 69 um so viel größer als die in G, als der Widerstand von a b kleiner ist als der von G. Die Stromstärke im Hauptstrom ist dann die Summe der Stromstärken in G und in a b. Gewöhnlich gibt man jetzt den Rollen oder Spulen der Galvanometer einen Widerstand, der sich in Dekaden ausdrückt, also von 1 Ohm, 10 Ohm, 100 oder 1000 Ohm, und ebenso nimmt man als Widerstand a b, zu dem man das Galvanometer parallel schaltet, einen einfachen dekadischen Widerstand, also 1 Ohm oder 0,1 oder 0,01 Ohm u. s. w.

Fig. 181.

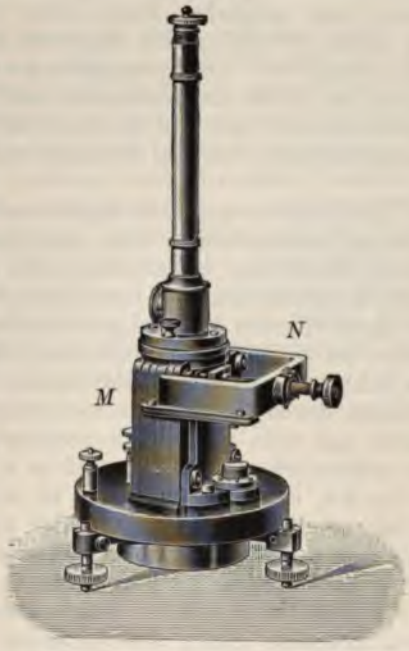
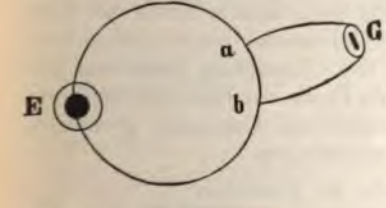


Fig. 182.

Man kann aber jedes Galvanometer noch zu einem anderen sehr wichtigen Zweck benutzen. Bei einem dauernden Strom, der durch den Draht des Galvanometers fließt, geht in jedem Moment eine bestimmte Elektrizitätsmenge durch den Draht. Die Stromstärke ist ja gleich der pro Sekunde durch jeden Querschnitt fließenden Elektrizitätsmenge, und ein solch dauernd fließender Strom bringt eine dauernde Ablenkung der Magnetnadel oder der Spule im Galvanometer hervor. Wenn man aber nur eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. diejenige, die sich auf der einen Belegung einer geladenen Leydener Flasche befindet, durch den Draht des Galvanometers fließen läßt, so erhält man nicht einen dauernden Strom, sondern einen momentanen Strom. Durch einen solchen bekommt die Nadel des Galvanometers gewissermaßen einen Stoß, so daß sie aus ihrer Ruhelage sich herausbewegt. Aber da der Stoß sofort aufhört, so bleibt die Nadel nicht abgelenkt, sondern kehrt nach einigen Schwingungen wieder in ihre Ruhelage zurück.

Fig. 183.



Der momentane Strom bewirkt, daß die Nadel von ihrer Ruhelage aus einen Ausschlag macht, der aber nicht anhält. Je größer die Elektrizitätsmenge ist, die momentan durch den Draht fließt, um so größer ist dieser erste Ausschlag. Man sieht, daß wenn man den ersten Ausschlag,

den die Nadel dabei macht, beobachtet, daß man daraus ein Maß für die ganze Elektrizitätsmenge hat, die durch den Draht geflossen ist.

Ein Galvanometer, das für diesen Zweck gebraucht wird, bezeichnet man als ballistisches Galvanometer. Jedes gewöhnliche Galvanometer eignet sich dazu. Damit aber der erste Ausschlag bei gegebener Elektrizitätsmenge möglichst groß sei, muß die Dämpfung des Galvanometers eine möglichst kleine sein. Bei Nadelgalvanometern nimmt man daher gewöhnlich den Kupferdämpfer heraus, wenn man es ballistisch verwerten will. Die Spulengalvanometer, bei denen die Dämpfung sehr groß ist, eignen sich daher für solche Zwecke viel weniger als die Nadelgalvanometer, und das ist ein weiterer Grund dafür, daß die Nadelgalvanometer nicht von den Spulengalvanometern verdrängt werden können.

Um die Elektrizitätsmenge, die durch den ersten Ausschlag gemessen wird, in Coulomb auszudrücken, muß man wieder den Reduktionsfaktor für diese ersten Ausschläge bestimmen, d. h. man muß bestimmen, wie groß der erste Ausschlag ist, den eine bekannte Anzahl Coulomb hervorbringt. Wie das zu machen ist, wird aus dem folgenden gleich hervorgehen.

Mit einem so geeichten ballistischen Galvanometer ist es dann möglich, die Zahl der Coulomb zu bestimmen, welche bei einem sehr kurz dauernden Strom durch den Galvanometerdraht hindurchgegangen sind. Diese Methode hat eine große Anwendbarkeit für viele Zwecke. Zunächst aber interessiert es uns hier, daß es auf diese Weise möglich ist, die Kapazität eines Kondensators zu messen.

Haben wir nämlich einen Kondensator und verbinden wir die eine Belegung mit dem positiven Pol einer Batterie, die andere mit der Erde, zu welcher wir auch den anderen Batteriepol ableiten, so muß von der Batterie so viel Elektrizität auf die Platte überströmen, bis die Spannung der geladenen Belegung gleich der Spannung des mit ihr verbundenen Batteriepols ist und die Menge der auf dieser Platte liegenden Elektrizität ist dann (S. 14)

$$\text{Elektrizitätsmenge} = \text{Kapazität} \times \text{Spannung}.$$

Die Spannung kennt man aber; diese ist gleich der elektromotorischen Kraft der angewendeten Batterie. Die Elektrizitätsmenge kann man aber eben ballistisch in Coulomb messen, und so kann man daraus die Kapazität berechnen. Um die Elektrizitätsmenge zu messen, die auf dem Kondensator enthalten ist, verbindet man nach der Ladung die geladene Platte des Kondensators mit dem einen Pol des ballistischen Galvanometers, dessen anderer Pol ebenfalls zur Erde abgeleitet ist. Der erste Ausschlag desselben gibt die Zahl der Coulomb an, die von der positiven Platte zur Erde übergeströmt sind. Die Spannung der Batterie wird durch ein Voltmeter gemessen, und so findet man aus diesen beiden Beobachtungen

$$\text{Kapazität in Farad} = \frac{\text{Anzahl der Coulomb}}{\text{Spannungsdifferenz in Volt}}.$$

Auf diese Weise hat man in dem Galvanometer auch ein Mittel, um Kapazitäten zu messen.

Wenn man umgekehrt einen Kondensator von schon bekannter Kapazität hat (z. B. 1 Mikrofarad, oben S. 19) und diesen z. B. in städti-

schen Zentralen mit der Lichtleitung von 110 Volt ladet, so liegt auf ihm die bekannte Elektrizitätsmenge 110 Mikrocoulomb. Läßt man diese bekannte Elektrizitätsmenge durch das Galvanometer zur Erde gehen, so erhält man einen bestimmten Ausschlag und hat damit das ballistische Galvanometer geeicht, seinen Reduktionsfaktor bestimmt, da man dadurch weiß, wie groß der erste Ausschlag für 1 Mikrocoulomb oder 1 Coulomb ist.

Auf diese Weise kann man nun auch, wie man leicht einsieht, die Dielektrizitätskonstante einer Substanz (S. 27) messen. Wenn man zwischen zwei Kondensatorplatten einmal Luft als Zwischenmedium hat, das andere Mal die zu untersuchende Substanz, z. B. Glas, so ist die Kapazität des Kondensators beidemal verschieden. Und wenn man diesen Kondensator beidemal von derselben Batterie aus ladet, und durch dasselbe Galvanometer entladet, so verhalten sich die ersten Ausschläge des Galvanometers in beiden Fällen wie die beiden Kapazitäten des Kondensators. Das Verhältnis der Kapazitäten nannten wir aber die Dielektrizitätskonstante der angewendeten Substanz. So vielmal größer als der Ausschlag des Galvanometers im zweiten Fall gegenüber dem im ersten ist, so groß ist die Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums (Glas) bezogen auf Luft als Einheit.

8. Kapitel.

Die Kraftwirkungen elektrischer Ströme aufeinander (Elektrodynamik).

Die elektromagnetischen Erscheinungen, die wir in dem vorhergehenden Kapitel behandelt haben, ließen sich alle in kurzer Weise so zusammenfassen, daß galvanische Ströme, Stromkreise, sich genau ebenso verhielten wie Magnete. Ein Solenoid (eine von einem Strom durchflossene Drahtspirale), wenn es beweglich aufgehängt war, stellte sich in den magnetischen Meridian wie ein Magnet, es wurde von einem Magneten angezogen und abgestoßen wie ein Magnet, es hatte seinen Nord- und Südpol wie ein Magnet, es übte auf einen Magneten Anziehungs- und Abstoßungskräfte aus wie ein Magnet, es machte weiches Eisen magnetisch wie ein Magnet. Der Gedanke liegt nahe, daß nun zwei stromdurchflossene Solenoide, zwei Stromkreise aufeinander ebenso mit anziehenden und abstoßenden Kräften wirken werden wie zwei Magnete. Man hätte dann zwischen zwei Strömen allein, ganz ohne Magnete, anziehende und abstoßende Kräfte. Dieser Gedanke zeigte sich bestätigt. Es war Ampère, welcher diese Einwirkung von galvanischen Strömen aufeinander untersuchte, und welcher durch scharfsinnige Experimente und Überlegungen diese Wirkungen elektrischer Ströme aufeinander vollständig aufklärte. Man nennt die gesamte Lehre von den mechanischen Kräften, die galvanische Ströme aufeinander ausüben, Elektrodynamik.

Um die mechanischen Wirkungen von galvanischen Strömen aufeinander studieren zu können, mußte Ampère die Ströme, wenigstens teilweise, beweglich machen. Es wird also bei diesen Untersuchungen am besten wieder das Ampèresche Gestell angewendet, das schon im vorigen Kapitel beschrieben wurde. Dem beweglichen Stromkreis muß man dann einen festen nähern, um die Anziehungen oder Abstoßungen bestimmen zu können. Wenn man in Fig. 184 durch das Ampèresche Gestell (links in der Figur) einen Strom in der durch die Pfeile angegebenen Richtung hindurchsendet und diesem beweglichen Stromkreis den festen Stromkreis g f (rechts) nähert, so tritt folgendes ein:

Fließt der positive Strom in g f von unten nach oben, also in gleicher Richtung wie in c b, so wird c b von g f angezogen. Fließt der Strom in f g von oben nach unten, also in entgegengesetzter Richtung wie in c b, so wird c b abgestoßen. Ganz ebenso verhält sich die Seite a d des beweglichen Stromkreises. Fließt der Strom in f g in gleicher Richtung wie in a d, so wird a d angezogen, c b abgestoßen; fließt der Strom in f g in entgegengesetzter Richtung wie in a d, so wird a d abgestoßen, c b angezogen. Es ergibt sich daraus der Satz: Zwei parallele gleichgerichtete Ströme ziehen einander an, zwei parallele in entgegengesetzter Richtung fließende Ströme stoßen einander ab.

Da ein beweglicher Drahtkreis, wie der in Fig. 184 gezeichnete, schon von selbst unter dem Einfluß des Erdmagnetismus eine gewisse bestimmte Stellung einnimmt, wie wir S. 179 gesehen haben, indem seine Ebene sich senkrecht zum magnetischen Meridian stellt, so tritt diese Anziehung und Abstoßung zweier paralleler Ströme hierbei nicht ganz rein auf. Um daher von der Einwirkung des Erdmagnetismus, welche bei diesen Untersuchungen nur störend wirken kann, frei zu sein, hat Ampère einen sogenannten astatischen Stromkreis konstruiert, welcher in Fig. 185 abgebildet ist. In diesem fließt nämlich in den beiden äußeren Drähten der Strom nach einer und derselben Richtung, ebenso in den beiden mittleren Drähten. Denken wir uns jede Drahthälfte durch einen kleinen Magneten ersetzt, der senkrecht durch die Ebene des Drahtes hindurchgesteckt ist, so ist der nach vorn zum Beschauer hin gerichtete Pol dieses Magneten für den Stromkreis b c d a ein Nordpol, für den Stromkreis c d e f ein Südpol. Die beiden Hälften zusammen verhalten sich also wie ein astatisches Magnetpaar, und daher hebt sich auch die Wirkung des Erdmagnetismus auf den ganzen Stromkreis auf, und dieser bleibt in jeder Lage in Ruhe, stellt sich nicht senkrecht zu dem magnetischen Meridian. Nähert man nun diesem astatischen Leiter jetzt einen festen Stromkreis, so kann man deutlich sehen, daß parallele gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete Ströme sich abstoßen. Als festen Stromkreis nimmt man zweckmäßig nicht bloß einen einfachen Draht, wie in Fig. 184, sondern einen ganzen Rahmen mit vielen nebeneinander und aufeinander liegenden Drähten, in denen allen der Strom in derselben Richtung fließt. Eine solche Anordnung zeigt Fig. 186. Auf dem Stativ G steht beweglich der astatische Stromkreis, M N ist der mit Draht umwundene Rahmen. Ströme von 3 bis 4 Ampere Stärke werden durch die Klemmschrauben in die Drähte geleitet und können durch die Kommutatoren R und S kommutiert werden. In der Figur sind die Ströme in m n und M N gleich gerichtet. Diese ziehen sich also an und stellen sich einander parallel.

Fig. 184.

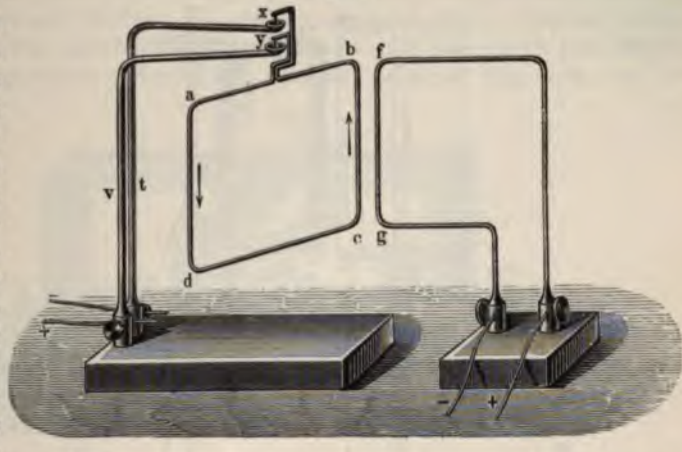
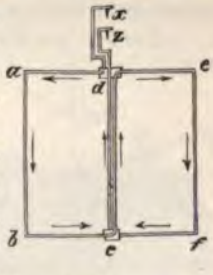
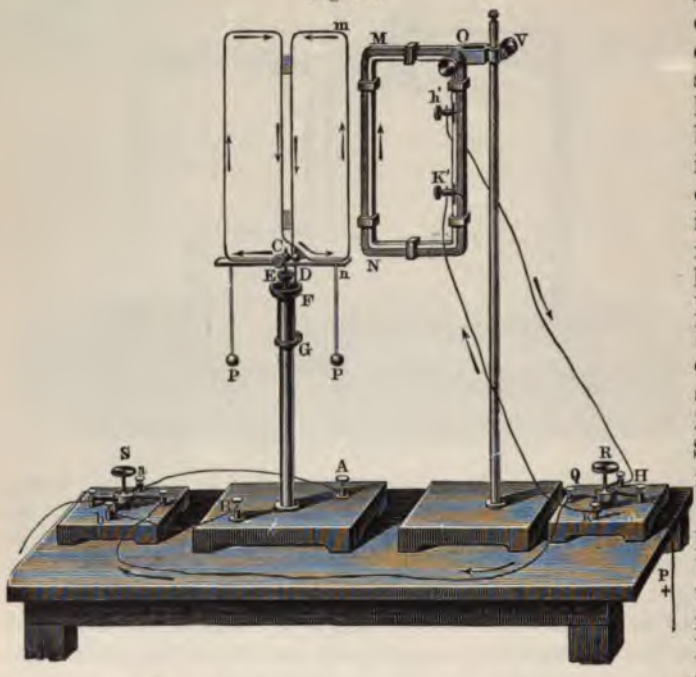


Fig. 185.



Nach der Untersuchung von parallelen Stromteilen ging Ampère über zu der Untersuchung von gekreuzten Stromteilen. Zwei gekreuzte Ströme können entweder in einer und derselben Ebene liegen, wie die beiden Ströme in Fig. 187, oder sie können in verschiedenen Ebenen liegen, wie in Fig. 188. Für beide Fälle gilt ein und dasselbe Gesetz. Zwei gekreuzte Ströme haben immer einen Kreuzungspunkt, entweder einen wirklichen, wie in Fig. 187 den Punkt f, oder einen gedachten, wie in Fig. 188 den Punkt r. Das Gesetz, das Ampère für diese gekreuzten Ströme gefunden hat, lautet nun:

Fig. 186.



Zwei gekreuzte Ströme suchen sich in jedem Fall so zu stellen, daß sie parallel werden und der Strom in ihnen nach derselben Richtung fließt.

Fig. 187.

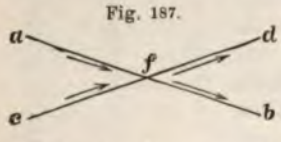
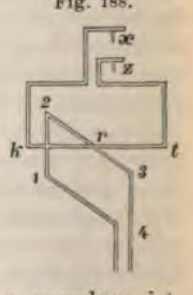


Fig. 188.

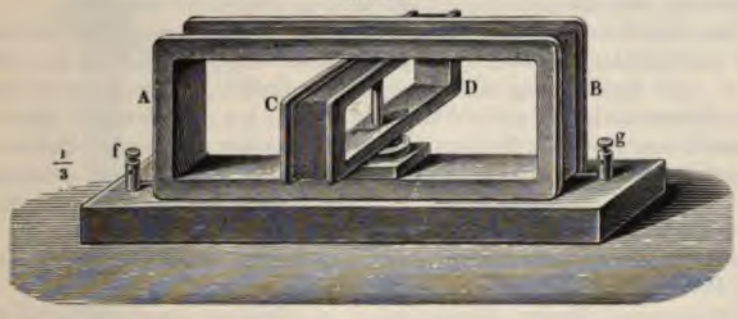


Man kann diese Wirkung zweier gekreuzter Ströme sehr gut an dem in Fig. 189 gezeichneten Apparat sehen. In demselben ist ein fester Rahmen A B mit einer Reihe von Drahtwindungen versehen, in welche ein Strom durch die Klemmschrauben f und g eingeführt wird. Innerhalb des festen Rahmens befindet sich ein beweglicher leichter Rahmen C D, der auch mit einer Lage von Drahtwindungen versehen ist. Auch in diese Drähte kann durch eine, in der Figur nicht gezeichnete Vorrichtung mittels Quecksilbernäpfchen ein Strom geführt werden. In der Figur sind die beiden Drahtkreise gekreuzt gezeichnet. Sie streben also danach, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen, und in der Tat fängt der innere Rahmen sich unter der Einwirkung der Ströme an

zu drehen, bis die Drahtwindungen einander parallel stehen und die Ströme in ihnen gleichgerichtet sind.

Diese beiden qualitativen Gesetze der Wirkung paralleler und gekreuzter Ströme lassen sich in dem einen Satz zusammenfassen, daß zwei Ströme sich, welche Stellung sie auch zueinander haben, immer parallel und gleichgerichtet zu stellen suchen. Denkt man sich durch jede Stromebene ihre magnetischen Kraftlinien gezogen, so heißt dies auch, daß die

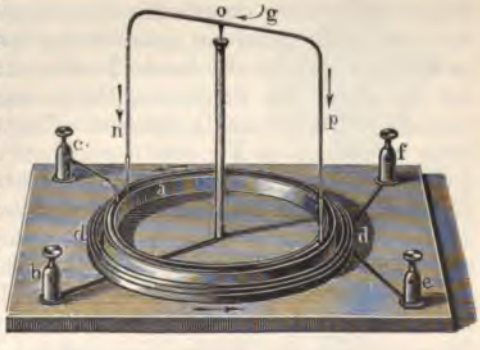
Fig. 189.



Kraftlinien zweier Stromkreise sich parallel und nach derselben Richtung einzustellen suchen.

Aus diesem Satz aber ergibt sich sofort, daß, wenn der bewegliche Stromkreis drehbar angebracht ist, eine Anordnung zu treffen sein muß, welche bewirkt, daß er unter dem Einfluß des festen Stromkreises in fortlaufende und weitergehende Rotation kommt. Das wird dann der Fall sein, wenn die Kraftlinien des beweglichen Stromkreises in jeder Stellung senkrecht zu denen des festen Stromkreises sind. Dann suchen sich diese immer parallel zu stellen, können aber die parallele Lage nicht erreichen. Die Anordnung muß also ganz entsprechend den oben S. 180 und 181 angeführten sein, bei welchen ein Stromkreis und ein Magnet aufeinander wirken. Ein solcher elektrodynamischer Rotationsapparat ist in Fig. 190 gezeichnet. Von der Klemme b führt ein Draht in eine Metallsäule, welche oben in einem Quecksilbernäpfchen vermittels einer Spitze den Draht n o p trägt. Der Strom geht in der Säule nach oben und dann durch die beiden Drähte n und p nach unten. Diese tauchen in eine mit Quecksilber gefüllte Rinne a, welche mit der Klemme c durch einen Draht verbunden ist. Um die Rinne herum liegt ein kreisförmiger Kupferstreifen oder auch ein spiralförmig zusammengelegtes Kupferband, dessen Enden mit den Klemmen e und f verbunden sind. Leitet man nun

Fig. 190.



einen Strom durch den Kupferstreifen, so wird der Bügel p o n sich zu drehen anfangen, und zwar bei den in der Figur gezeichneten Stromrichtungen entgegengesetzt der Richtung, in welcher der positive Strom durch den Kupferstreifen fließt. Bei dieser Anordnung (und bei jeder anderen ähnlichen) rotiert, wie man sieht, nicht der ganze geschlossene Leiter, sondern nur ein Teil desselben, der eben durch Quecksilber trotz seiner Bewegung immer leitend mit dem anderen Teil verbunden bleibt. Einen ganzen geschlossenen Stromkreis kann man nie durch einen Strom, ebensowenig wie durch einen Magneten, in Rotation versetzen.

Was nun die Größe der Kräfte betrifft, die zwei geschlossene Stromkreise aufeinander ausüben, so hängt diese einerseits davon ab, welche L a g e und Entfernung die beiden Stromkreise gegeneinander haben, und andererseits hängt sie ab von der S t ä r k e der Ströme, die durch die beiden Leiterstücke fließen. Je stärker jeder der beiden Ströme ist, desto größer ist auch die Kraft, mit welcher die Stromkreise aufeinander wirken. Die (elektrodynamische) Kraft zwischen zwei geschlossenen Stromkreisen hängt immer ab von dem P r o d u k t d e r S t r o m s t ä r k e n in ihnen, sie ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer dieses Produkt ist.

Durch eine große Reihe sehr sorgfältiger und scharfsinniger Experimente hat W i l h e l m W e b e r die elektrodynamische Kraft genau zahlenmäßig untersucht. Es diente ihm zu dieser Untersuchung eine feste und eine bewegliche Drahtrolle, welche er in verschiedene Lagen gegeneinander und in verschiedene Entfernungen voneinander bringen konnte und durch welche er Ströme verschiedener Stärke senden konnte. Es zeigte sich dabei, daß die Kraft, mit welcher die bewegliche Drahtrolle von der festen angegriffen wurde, unter sonst gleichen Umständen (gleicher Lage und gleicher Form) direkt abhängt und nur abhängt von dem P r o d u k t der Stromstärken, die in den beiden Rollen herrschen. Weber konstruierte daher umgekehrt einen Apparat, das E l e k t r o d y n a m o m e t e r, bestehend aus einem festen und einem beweglichen Stromkreise, in welchem man direkt durch die Ablenkung des beweglichen Stromkreises auf die Größe des Produktes der Stromstärken schließen konnte, welche in beiden Stromkreisen herrschen. Eine einfache Anordnung dieses Apparates war schon in Fig. 189 gezeichnet. Sendet man also e i n e n u n d d e n s e l b e n S t r o m durch beide Drahtrollen hintereinander, so ist die Kraft, mit welcher die bewegliche Rolle gedreht wird, proportional dem Q u a d r a t d e r S t r o m s t ä r k e. Wirkt dieser Kraft eine andere, z. B. die Torsionskraft eines Aufhängedrahtes, entgegen, so kommt die bewegliche Rolle in einer bestimmten Lage ins Gleichgewicht, in welcher sie um einen bestimmten Winkel von ihrer Anfangslage abgelenkt ist. Es gibt daher der Winkel, um welchen sich die innere Rolle C D dreht, ein Maß für das Quadrat der Stärke des Stromes, welcher beide Rollen durchfließt. W i r d d e r S t r o m i n b e i d e n R o l l e n z u g l e i c h k o m m u t i e r t, s o ä n d e r t s i c h d a h e r w e d e r d i e R i c h t u n g n o c h d i e G r ö ß e d e r A b l e n k u n g.

Ein solches Elektrodynamometer läßt sich also als Apparat zur Messung der Stromstärke benutzen. Die Größe der Kraft hängt ja direkt ab von dem Quadrat der Stromstärke. Und die Kraft wird ja leicht

durch den Winkel gemessen, um welchen sich die bewegliche Rolle unter ihrem Einfluß dreht. Mit einem Elektrodynamometer kann man aber nun auch, was man mit Voltametern und Galvanometern nicht kann, die Stärke von Strömen messen, deren Richtung rasch hintereinander wechselt, von Wechselströmen, wie solche von den Induktionsapparaten und den Wechselstrommaschinen geliefert werden. In der Tat bleibt ja die Ablenkung der beweglichen Rolle dieselbe, wenn der Strom in entgegengesetzter Richtung durch das Elektrodynamometer geleitet wird, falls er eben in beiden Rollen zugleich kommutiert wird.

Fig. 191.

$\frac{1}{4}$ n. Gr.

Bei allen Elektrodynamometern verschiedener Form befindet sich eine bewegliche Rolle innerhalb einer festen Rolle. Die Form der Rollen kann verschieden sein. Wir beschreiben hier zunächst nur das Elektrodynamometer für schwache Ströme von F. Kohlrausch, von dem Fig. 191 die Ansicht gibt (ausgeführt von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M.). Dasselbe ist, wie alle feinen Instrumente für schwache Ströme, zur Spiegelablesung eingerichtet. Die bewegliche Rolle, die in Fig. 192 besonders gezeichnet ist, besteht aus Drähten, die, wie man in der Figur sieht, auf einen Elfenbeinrahmen aufgewunden sind. An dem Rahmen ist ein Spiegel befestigt, den man durch das Fenster des Apparates mittels eines Fernrohres beobachtet. Die bewegliche Rolle hängt an einem Metallfaden, der oben an dem Kopf der Glasröhre befestigt ist. Die Achse der beweglichen Rolle trägt unten ein Platinblech, welches in ein Gläschen mit Schwefelsäure taucht. Dies dient einerseits dazu, um der beweglichen Rolle den Strom zuzuführen, andererseits aber um die Schwingungen der Nadel zu dämpfen. Man kann einen und denselben Strom durch die feste und die bewegliche Rolle senden, oder auch durch jede einen anderen

Fig. 192.

$\frac{1}{2}$ n. Gr.

Strom. In der Ruhelage sind die Drahtwindungen der beweglichen Rolle senkrecht zu denen der festen Rolle. Wird ein Strom durch beide Rollen gesendet, so sucht sich die bewegliche Rolle parallel der festen zu stellen, dreht sich also und tordiert dabei den Aufhängedraht. Sie bleibt daher in einer Lage in Ruhe, in welcher die elektrodynamische Kraft der Ströme gerade gleich der Torsionskraft des Aufhängedrahtes ist. Das Instrument ist sehr empfindlich, insbesondere für die schwächsten Wechselströme. Andere Elektrodynamometer und andere Anwendungen derselben werden wir in Kapitel 10 „Wechselströme" behandeln.

Die vollständige Analogie, welche zwischen Stromkreisen, insbesondere Solenoiden, und Magneten besteht, führte Ampère auf die Idee, daß man sich die Wirkungen eines Magneten erklären könne, wenn man ihn als ein System von galvanischen Kreisströmen ansähe. Wenn man annimmt, daß um jedes Molekül des Eisens, ob das Eisen nun magnetisch ist oder nicht, ein galvanischer Strom im Kreise herumfließt, so lassen sich alle Wirkungen eines Magneten durch die elektrodynamischen Wirkungen dieser Ströme, die Ampère Molekularströme nennt, erklären. In gewöhnlichem, unmagnetischem weichen Eisen liegen alle Moleküle mit ihren Molekularströmen ganz beliebig wirr durcheinander. Wenn dann ein bestimmter Molekularstrom nach außen z. B. anziehend wirkt, so gibt es immer einen anderen, der ebenso stark abstoßend wirkt. Ein Stück Eisen, in welchem also die Molekularströme beliebig durcheinander liegen, kann gar keine elektrodynamische Wirkung ausüben. Wenn man aber um dieses Stück Eisen eine Drahtspirale legt und einen Strom durch diese hindurchsendet, so wirkt dieser Strom auf jeden einzelnen der Molekularströme elektrodynamisch ein. Wir haben gesehen, daß gekreuzte Ströme sich immer parallel zu stellen streben. Wenn also die Moleküle mit ihren Molekularströmen frei beweglich sind, so müssen sich alle einzelnen Molekularströme so stellen, daß sie parallel und gleichgerichtet dem Strom in der Magnetisierungsspirale sind. Wenn daher in Fig. 193 durch die Richtung des äußeren Pfeiles die Richtung des magnetisierenden Stromes gegeben ist, so müssen alle Molekularströme sich so einstellen, wie es die Figur durch die Pfeile in den kleinen Kreisen anzeigt. Daraus erkennt man aber leicht, daß, wenn zwei nebeneinander liegende Molekularströme in gleicher Richtung fließen, dann an den Seiten, wo sie zusammentreffen, die Richtung des Stromes in beiden entgegengesetzt ist. In Fig. 194 werden beide Molekularströme in derselben Richtung, der Richtung der Pfeile, durchflossen, an den Seiten AB und CD aber fließen infolgedessen die Ströme entgegengesetzt, der eine nach oben, der andere nach unten. Es heben sich infolgedessen die Wirkungen aller dieser inneren Seiten auf und man kann nun annehmen, daß um jeden Magnet ein Strom herumfließt, der die Summe der äußersten Molekularströme ist. Einen Magnetstab (Fig. 195) kann man also einfach auffassen als einen Stab, welcher von einer großen Reihe von parallelen galvanischen Strömen umflossen ist. Die Pfeile stellen die einzelnen Molekularströme dar, sie haben alle

Fig. 193.

dieselbe Richtung. Wenn man nun den Magnetstab von der Seite S ansieht, so fließen die Ströme um dieses Ende in derjenigen Richtung, welche ein Uhrzeiger bei seiner Umdrehung hat. Betrachtet man dagegen die Ströme von dem mit N bezeichneten Ende, so fließen sie entgegengesetzt, wie der Zeiger der Uhr sich dreht. Obwohl also alle Molekularströme in gleicher Richtung fließen, ist der Sinn der Stromrichtung für den Außenraum bei dem einen Ende ein anderer als bei dem anderen. Das eine Ende wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Da wir bei der Magnetisierung durch einen Strom bereits gesehen haben (S. 161), daß um den Südpol der magnetisierende Strom in der Richtung des Uhrzeigers fließt, so können wir sofort sagen, daß auch die Molekularströme um den Südpol die Richtung des Uhrzeigers haben werden. In der Fig. 195 sind die Molekularströme auch so gezeichnet.

Fig. 194.

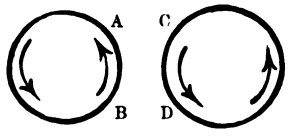


Fig. 195.

Durch diese Auffassung eines Magneten als eines Systems von parallelen Kreisströmen kann man nun alle elektromagnetischen Erscheinungen auf elektrodynamische zurückführen. So kann man die Anziehung und Abstoßung von Magneten aufeinander erklären als die elektrodynamischen Anziehungen und Abstoßungen der Molekularströme. Ebenso ist die Anziehung und Abstoßung von Magneten und Solenoiden nur ein spezieller Fall der elektrodynamischen Wirkung von zwei Solenoiden aufeinander.

Wir hatten bei allen früher betrachteten Wirkungen des elektrischen Stromes, bei den Wärme-, Licht- und chemischen Wirkungen eine merkwürdige Reziprozität gefunden. Jede Wirkung, die ein elektrischer Strom hervorrief, war, wenn sie von der Richtung des Stromes abhängt, umgekehrt im stande, selbst wieder einen elektrischen Strom zu erzeugen. Es liegt nahe, zu vermuten, daß auch alle die Wirkungen, welche wir in den beiden letzten Kapiteln besprochen haben, Wirkungen, welche ja wesentlich von der Richtung des Stromes abhängen, umgekehrt selbst im stande sein werden, elektrische Ströme hervorzubringen. Wir sahen, daß ein elektrischer Strom Eisen magnetisch macht; wir können fragen, ob nicht auch umgekehrt Magnetisierung von Eisen einen elektrischen Strom hervorbringt. Wir sahen, daß durch elektrische Ströme Magnete bewegt werden. Wir können fragen, ob nicht auch durch Bewegung von Magneten Ströme erzeugt werden. Beide Fragen werden mit Ja beantwortet werden. Wir sahen, daß durch einen festen galvanischen Strom ein beweglicher bewegt wird, ja sogar in dauernde Rotation kommen kann. Es wird sich umgekehrt zeigen, daß durch die bloße Bewegung eines galvanischen Stromes auch Ströme erzeugt werden können. Kurz, alle die Wirkungen, welche wir bis jetzt betrachtet haben, gestatten eine Umkehrung, und diese umgekehrten Wirkungen werden Induktionswirkungen genannt.

9. Kapitel.

Induktion.

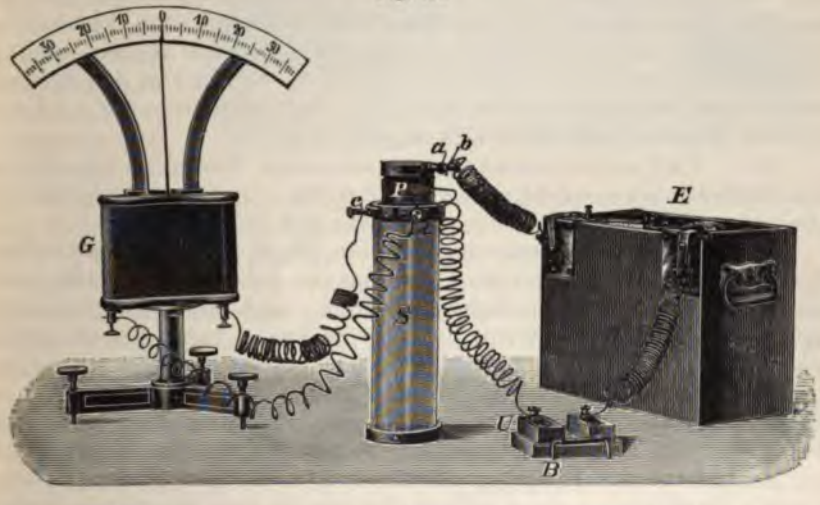
Michael Faraday, dessen Name bei der Entwickelung unserer Kenntnisse von der Elektrizität in allererster Reihe genannt werden muß, Michael Faraday ist es, von dem die so überaus wichtigen und interessanten Erscheinungen der elektrischen Induktion nicht nur entdeckt, sondern auch fast vollständig erforscht wurden. Faraday ging aus von den Erscheinungen der elektrischen Influenz, die lange bekannt waren. Ein jeder elektrisch geladene Körper bringt auf einem anderen in seiner Nähe befindlichen durch Influenz ebenfalls Elektrizität hervor. Die bloße Anwesenheit eines elektrischen Körpers ist imstande, einen vorher unelektrischen Körper elektrisch zu machen. Sollte nicht auch bei elektrischen Strömen etwas Ähnliches stattfinden? Sollte nicht auch durch einen Strom, der in einem Leiter fließt, in einem anderen in der Nähe befindlichen geschlossenen Leiter ein elektrischer Strom erregt werden? Diese Frage stellte sich Faraday und suchte sie durch geschickt ausgedachte und ausgeführte Versuche zu beantworten. Was er fand, entsprach nicht ganz seinen ursprünglichen Vermutungen; die von ihm entdeckten Erscheinungen waren so auffallend und wunderbar, daß er seine Anschauungen oft modifizieren mußte. Aber mit dem größten experimentellen Scharfsinn und Geschick wußte er die Erscheinungen so zu verfolgen, daß fast alles, was wir von ihnen wissen, sein Werk ist. Man muß in den Originalberichten Faradays nachlesen, wie viele mühevolle und schwierige Versuche fehlschlugen, wie endlich nach einer großen Reihe von vielfach variierten Experimenten sich eine Spur der Wirkung zeigte, welche er suchte, und wie er dann diese Spur verfolgte und ausbeutete, um einen richtigen Begriff von Faradays Genie zu bekommen. Jetzt, wo diese Erscheinungen genau bekannt sind, ist es nicht mehr nötig, den mühevollen stufenweisen Weg zu gehen, den Faraday einschlagen mußte, jetzt können wir bald mitten in die Erscheinungen hineingreifen und von vornherein diejenigen Bedingungen annehmen, die sich als vorteilhaft erwiesen haben.

Immer, wenn ein elektrischer Strom in einem Stromkreis geöffnet oder geschlossen wird, entsteht in einem in der Nähe befindlichen geschlossenen Leiter ein momentaner elektrischer Strom.

Die beiden Leiterkreise sind also ganz voneinander getrennt, es existiert gar keine leitende Verbindung zwischen ihnen und doch entsteht durch das Öffnen und Schließen eines von einem Strome durchflossenen Leiters in einem eben noch ganz stromlosen geschlossenen Drahtkreis ein momentaner galvanischer Strom. Um diese Erscheinung leicht hervor-

zurufen, ist es notwendig, daß die beiden Stromkreise sich sehr nahe aneinander befinden. Man nimmt deshalb am besten zwei Hohlzylinder von Holz und wickelt auf jeden von ihnen einen Draht spiralförmig auf. Den engeren Zylinder stellt man in die Höhlung des weiteren hinein. So hat man zwei getrennte Drähte, die einander sehr nahe sind. In Fig. 196 sind diese beiden Zylinder mit P und S bezeichnet. Die Enden des Drahtes auf dem weiten Zylinder S sind nach zwei Klemmschrauben c und d geführt, die des Drahtes auf dem engen Zylinder P nach a und b. Nun verbindet man die äußere Spule mit einem Galvanoskop G und die innere Spule unter Einschaltung eines Unterbrechers U (wie er in Fig. 61 dargestellt wurde) mit einem Element E (hier einem Akkumulator). Man hat so zwei geschlossene Leiterkreise; in dem inneren fließt fortwährend

Fig. 196.



ein Strom, in dem äußeren nicht. Sowie man aber nun den Strom in dem inneren Drahtkreis unterbricht, indem man den Bügel B, wie es in der Figur gezeichnet ist, aus den Quecksilbernäpfchen des Unterbrechers herausnimmt, wird die Nadel des Galvanoskops momentan abgelenkt, kehrt aber sofort wieder zurück. Sowie man den Strom in der inneren Spirale wieder schließt durch Eintauchen des Bügels B, wird die Nadel wieder abgelenkt, aber ebenfalls nur einen Moment und kehrt auch sofort wieder zurück. Es wird also in der Tat durch die Öffnung oder Schließung des Stromes in P ein momentaner Strom in dem Leiter S erregt, in dem Leiter, welcher gar keine Verbindung mit P hat, welcher nur in der Nähe von P sich befindet. Man nennt diese momentanen Ströme Induktionsströme und kann also sagen, beim Öffnen und Schließen des Stromes in P wird in S ein momentaner Strom induziert. Man nennt die Spule P die induzierende Spule, die Spule S die induzierte oder Induktionsspule. Die Induktionsspule S wird gewöhnlich aus sehr feinem Kupferdraht verfertigt, welcher mit Seide umsponnen ist, damit man viele Windungen nebeneinander und

übereinander bringen kann, ohne daß sie in leitende Verbindung kommen. Die Spule P besteht aus dickem Kupferdraht, damit der Strom in ihr recht stark wird.

Wenn man aber die durch die momentanen Induktionsströme hervorgebrachten Ausschläge der Nadel des Galvanoskops betrachtet, so findet man, daß ein Unterschied in der Richtung des Ausschlages stattfindet, je nachdem der induzierende Strom geöffnet oder geschlossen wird. Wird der induzierende Strom geöffnet, so geht die Nadel nach der einen Seite, wird er geschlossen, so geht sie nach der anderen Seite. Aus der Richtung der Nadelablenkung kann man aber schließen, in welcher Richtung der positive Strom durch die induzierte Spule läuft, und so findet man, daß der induzierte Strom, der durch Schließen entsteht, in entgegengesetzter Richtung durch die Induktionsspule läuft wie der induzierende Strom durch die induzierende Spule, daß dagegen der Induktionsstrom, der durch Öffnen entsteht, dieselbe Richtung hat wie der Strom in der induzierenden Spule.

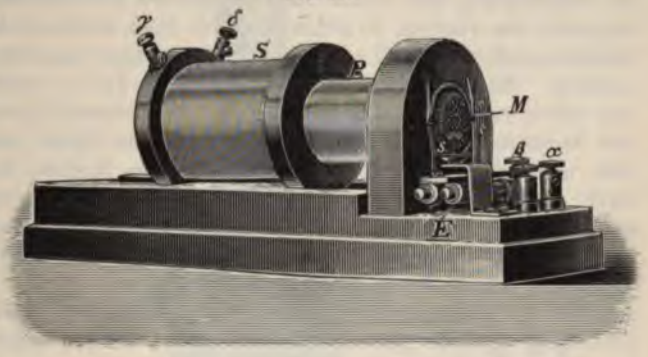
Man bezeichnet den induzierenden Strom, also den in der Spule P, auch oft als den primären Strom, den induzierten als sekundären Strom und kann also sagen:

Der Induktionsstrom (sekundäre Strom) hat beim Schließen die entgegengesetzte, beim Öffnen die gleiche Richtung wie der primäre Strom.

Taucht man rasch hintereinander den Bügel B in die Quecksilbernäpfchen ein und zieht ihn wieder heraus, so bekommt man also rasch hintereinander momentane Induktionsströme nach der einen und nach der anderen Richtung. Wenn diese Ströme sehr rasch hintereinander folgen, so daß sich ein Strom nach der einen Richtung sehr rasch an den vorhergehenden nach der anderen Richtung anschließt, so nennt man sie Wechselströme. Es kann also ein Stromkreis auch von Wechselströmen durchflossen werden, ebenso wie er von einem Strom von gleichbleibender Richtung durchflossen wird. Bei Wechselströmen wechselt die Richtung des positiven Stromes in dem Stromkreis immerfort, und zwar sehr rasch hintereinander. Es ist natürlich nicht möglich, dadurch, daß man den Draht aus dem Quecksilber mit der Hand herausnimmt und wieder einsteckt, sehr schnell wechselnde Ströme in der Induktionsspule zu bekommen. Wenn man aber den primären Strom, bevor er in seine Spule kommt, durch einen Neefschen Hammer (S. 183) gehen läßt, so bewirkt dieser ja selbsttätig rasch aufeinander folgende Schließungen und Öffnungen des Stromes und man bekommt daher in der induzierten Spule fortwährend Induktionsströme, bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung. Eine Einrichtung dazu zeigt Fig. 197. Von einem Element geht der Strom zu den beiden Klemmen α und β und von diesen um den Elektromagneten E des Neefschen Hammers, der hier horizontal liegt, dann durch die primäre Spule P des Induktionsapparates und von dieser durch die Spitze s und die Feder des Hammers zum Element zurück. Sobald der Strom in der primären Spule fließt, wird die Feder angezogen und dadurch der Strom unterbrochen. Die Feder schnellt dann wieder zur Spitze und schließt den Strom wieder. Bei jeder Öffnung *und* Schließung entsteht dann in der sekundären Spule S ein Induktions-

strom. Solche Ströme sind z. B. für medizinische Zwecke sehr nützlich. Man führt dann die Enden der induzierten Spule, die zu den Klemmen γ und δ geleitet sind, in zwei Messingzylinder, wie in Fig. 198, und gibt diese dem zu elektrisierenden Menschen in die Hände. Dann gehen die Wechselströme durch den menschlichen Körper und üben in gewissen Fällen heilsame Wirkungen aus. Wir werden im Kapitel 10 ausführlicher mit Wechselströmen beschäftigen.

Fig. 197.



Bei jeder Öffnung und bei jeder Schließung des primären Stromes werden also in der Induktionsspule momentane Ströme erzeugt. Es ist aber gar nicht einmal nötig, einen Strom ganz zu unterbrechen, um einen Induktionsstrom zu bekommen. Schon jede Schwächung oder Verstärkung des primären Stromes erzeugt in der Induktionsspule einen Induktionsstrom, und zwar hat in Bezug auf die Richtung des erzeugten Induktionsstromes die Schwächung dieselbe Wirkung wie die Öffnung, während die Verstärkung dieselbe Wirkung hat wie die Schließung.

Fig. 198.

Ja noch mehr. Es ist nur nötig, die eine Spule gegen die andere irgendwie zu verschieben, um einen momentanen Induktionsstrom zu bekommen. Wenn man durch die primäre Spule P, die in Fig. 197 gezeichnet ist, ohne Benutzung des Hammers einen konstanten Strom fließen läßt (indem man etwa die Spitze so fest an die Feder anlegt, daß sie sich nicht trennen können) und die weitere Induktionsspule S nur über sie weg zieht oder schiebt, so erhält man in S schon einen Induktionsstrom. Schiebt man S nach der einen oder anderen Seite, so erhält man jedesmal einen Induktionsstrom, aber beide Male von entgegengesetzter Richtung. Man braucht also die induzierte Spule der primären nur zu nähern oder sie von ihr zu entfernen, um einen Induktionsstrom zu erhalten. Bei dieser Näherung und Entfernung ist es natürlich gleichgültig, ob die primäre Spule beweglich, und die sekundäre, induzierte, fest ist, oder ob umgekehrt die primäre Spule fest und die sekundäre beweglich ist. Nähert man die primäre und die induzierte Spule einander, so fließt der Induktionsstrom in S in entgegengesetzter Richtung wie in P, also ebenso wie beim Schließen des

Stromes. Entfernt man dagegen S von P, so hat der Induktionsstrom in S dieselbe Richtung wie der Strom in P. Beim Entfernen hat also der Induktionsstrom dieselbe Richtung wie beim Öffnen.

Man hat es auch hier in der Hand, durch abwechselndes Annähern und Entfernen eines Stromkreises in einem anderen Leiterkreise fortwährend Ströme von abwechselnden Richtungen zu erzeugen. Geht die Annäherung und Entfernung der beiden Stromkreise sehr rasch hintereinander von statten, so schließen sich diese wechselnden Ströme so rasch hintereinander an, daß sie den Eindruck eines ununterbrochenen Stromes machen. Es entstehen wieder Wechselströme. Man kann aber hier schon erkennen, daß es sehr leicht ist, durch Induktion auch Ströme von konstanter Richtung in der induzierten Spule zu erzeugen. Wenn man nämlich die primäre Spule mit einem Kommutator in Verbindung setzt, so daß jedesmal, wenn sie der anderen Spule genähert oder von ihr entfernt wird, der Strom in ihr kommutiert wird, so werden in der induzierten Spule beide Male Ströme von derselben Richtung erzeugt. Und wenn die Annäherung und Entfernung rasch genug geht, so bekommt man in der induzierten Spule in der Tat Ströme von einer bestimmten Richtung, die sich ganz ebenso verhalten wie ein kontinuierlicher Strom. Es ist also möglich, durch Bewegung eines Stromes in Verbindung mit einem passend eingerichteten Kommutator induzierte Ströme von konstanter Richtung in einem Kreise hervorzubringen.

Es ist übrigens ausdrücklich zu erwähnen, daß in der Induktionsspule unter den angegebenen Umständen immer Induktionsströme erzeugt werden, ob nun die Spule vorher noch ganz stromlos war, oder ob sie schon außerdem von einem Strome durchflossen ist. In letzterem Fall addiert oder subtrahiert sich der momentane Induktionsstrom zu (resp. von) dem schon vorhandenen Strome, je nachdem ihre Richtungen gleich oder entgegengesetzt sind.

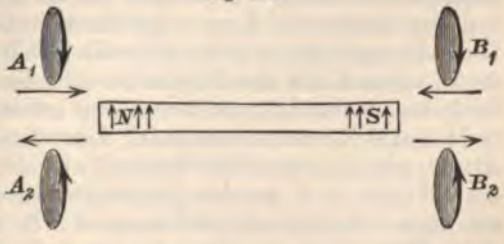
Die vielen Beziehungen, die wir zwischen galvanischen Strömen und Magneten gefunden haben, legen nun die Frage nahe, ob nicht auch Magnete in eben derselben Weise induzierend wirken können wie Stromkreise. Und hiermit sind wir zu einer Reihe von Erscheinungen gekommen, die in den letzten Jahrzehnten der Elektrizität eine gewaltige Wirksamkeit verschafft haben, zu Erscheinungen, welche die Grundlage der ganzen modernen Entwickelung der Elektrotechnik bilden. Man bezeichnet sie als Erscheinungen der Magnetoinduktion und im Gegensatz dazu die eben behandelten Fälle als solche der Elektroinduktion.

Da ein Magnet sich bekanntlich genau so verhält, als ob er aus einer großen Menge von gleichgerichteten Molekularströmen bestände, so muß die Annäherung eines Magnets an eine geschlossene Drahtspule einen momentanen Induktionsstrom erzeugen, und ebenso muß durch die Entfernung des Magnets ein momentaner Induktionsstrom in der Drahtspule erzeugt werden. Diese Folgerung aus allen unseren bisherigen Kenntnissen zeigt sich nun in der Tat bestätigt. Wenn man in Fig. 199 den Magnetstab N S in die Drahtspule A, deren Enden durch ein Galvanoskop G verbunden sind, hineinstößt, so entsteht in der Spule ein momentaner Induktionsstrom, der die Magnetnadel des Galvanoskops zum *Ausschlag* bringt. Zieht man den Magneten aus der Drahtspule wieder

heraus, so erhält man wieder einen momentanen Induktionsstrom, der aber nach der entgegengesetzten Richtung fließt. Aber nicht bloß das Hinein- oder Herausschieben, sondern jede Lagenänderung eines Magneten in Bezug auf die Drahtspule bringt einen Induktionsstrom hervor. Über die Richtung der Induktionsströme kann man sich auch sofort klar werden, wenn man sich die Molekularströme gezeichnet denkt. Um den Südpol fließen die Molekularströme in der Richtung des Uhrzeigers, folglich fließen sie in der Drahtspule bei Annäherung eines Südpols umgekehrt, bei Annäherung eines Nordpols in derselben Richtung. Das Entgegengesetzte findet statt, wenn der Südpol oder Nordpol von der Spule entfernt wird. Dabei aber hat man natürlich zu beachten, daß man, um diese Uhrzeigerregel anzuwenden, von der Drahtspule immer nach dem betreffenden Pole hinzusehen hat. Es ist z. B. in Fig. 200 ein Magnetstab N S mit der Richtung der Molekularströme gezeichnet und links davon ein Drahtkreis A_1, der sich nähert, und ein Drahtkreis A_2, der sich entfernt. Die Ströme haben die durch die Pfeile angegebene Richtung. Rechts sind zwei andere Drahtkreise B_1 und B_2, und die Richtung der Molekularströme zeigt auch in diesem Falle, daß die Pfeile in den Drahtkreisen richtig gezeichnet sind. Im Drahtkreise A_1, der sich dem Nordpol nähert, und im Drahtkreis B_2, der sich vom Südpol entfernt, fließen die Ströme, wenn man sie von den entsprechenden Polen aus betrachtet, in derselben Richtung (nämlich

Fig. 199.

Fig. 200.



umgekehrt wie der Uhrzeiger), absolut genommen aber in entgegengesetzten Richtungen.

Es lassen sich alle Fragen über die Richtung der Induktionsströme bei der Annäherung oder Entfernung von Strömen oder Magneten an Drahtkreise sehr einfach in ein Gesetz zusammenfassen, wenn man an die Anziehung und Abstoßung denkt, die ein Stromkreis auf einen anderen oder ein Stromkreis auf einen Magneten ausübt.

Man kann dieses Gesetz folgendermaßen aussprechen: Bei jeder Bewegung eines Stromes oder eines Magneten in der Nähe eines Drahtkreises entsteht in dem letzteren ein Strom. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob der Strom resp. der Magnet sich gegen den Drahtkreis bewegt, oder der Drahtkreis gegen den Strom resp. Magneten. Die Richtung des entstehenden induzierten Stromes ist immer eine solche, daß derselbe vermöge der elektrodynamischen (oder elektromagnetischen) Wirkung auf den induzierenden Strom resp. Magneten diesem die entgegengesetzte Bewegung erteilen würde.

Wird also z. B. in Fig. 200 der Stromdraht A_1 dem Nordpol genähert, so muß der Strom in ihm diejenige Richtung erlangen, daß der Stromdraht von dem Nordpol abgestoßen wird. In der Tat sehen wir an der Zeichnung der Pfeile, daß die Abstoßung stattfinden würde, da gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete sich abstoßen. Dieses allgemeine Gesetz ist von Lenz ausgesprochen worden und heißt das Lenzsche Gesetz.

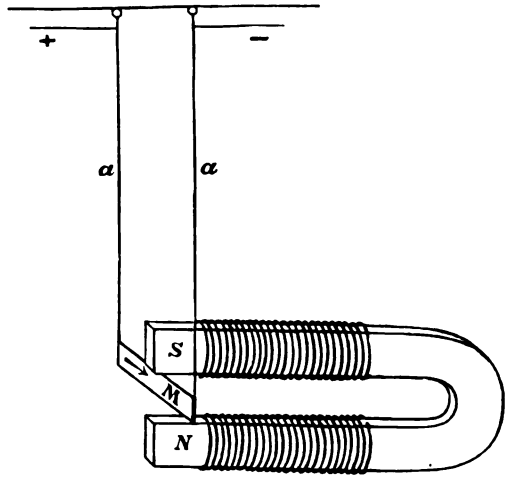
Das Lenzsche Gesetz hat übrigens eine tiefere Bedeutung. Es ist nämlich ein Ausdruck dafür, daß auch bei den Induktionsströmen das Gesetz von der Erhaltung der Energie gültig ist. Nehmen wir an, um das einzusehen, daß wir zwei Stromspulen A und B haben, in welchen je ein Strom nach derselben Richtung zirkuliert. A sei fest, B sei beweglich. Wir wissen aus dem elektrodynamischen Gesetz von Ampère, daß zwei gleichgerichtete Ströme sich anzuziehen suchen. Folglich bewegt sich der Stromkreis B auf A zu, er wird von A angezogen. Bei dieser Anziehung leisten aber die elektrischen Kräfte, die von A ausgehen, eine gewisse Arbeit. Woher kommt diese Arbeit? Welches ist ihr Äquivalent? Denn umsonst bekommen wir ja keine Arbeit in der Natur. Sie kann also nur geliefert werden auf Kosten der Energie des Stromes, welcher in A fließt. Diese Energie, die in jeder Sekunde gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft des Elementes und der Stromstärke im Kreise A ist, wird, wenn sonst keine äußere Arbeit geleistet wird, durch den Strom ganz in Joulesche Wärme verwandelt. Leistet der Strom aber noch eine positive Arbeit, wie hier, wo er den Strom B anzieht, so folgt daraus, daß die Joulesche Wärme in A um den ganzen Betrag dieser Arbeit kleiner sein muß, als wenn keine Arbeit geleistet wird. Da nun die Joulesche Wärme von dem Widerstand des Stromkreises und der Stromstärke abhängt, der Widerstand aber ja unverändert bleibt, so folgt, daß die Stromstärke in unserem Kreise A kleiner sein muß, wenn er den Kreis B anzieht, als wenn er das nicht tut. Die Folge der Bewegung von B nach A hin ist also

eine Verringerung der Stromstärke in A, d. h. die Erzeugung eines neuen Stromes (Induktionsstromes), welcher dem vorhandenen entgegenfließt und ihn dadurch schwächt. Das ist nun in der Tat der Ausdruck des Lenzschen Gesetzes. Denn da der ursprüngliche Strom in A der Annahme nach den Strom B anzuziehen suchte, so wird also durch die Annäherung von B an A in letzterem ein Strom erzeugt, welcher B abzustoßen sucht.

Was hier in dem einen Beispiel ausführlich entwickelt wurde, ist nun in allen anderen Fällen ganz ebenso durchzuführen, so daß wir also behaupten dürfen, das Lenzsche Gesetz ist eine notwendige Folge des Satzes von der Erhaltung der Energie.

Wir können die Richtung des durch Bewegung entstehenden Induktionsstromes auch durch eine Fingerregel darstellen, so wie wir oben (S. 181) die elektromagnetische Bewegung durch eine solche dargestellt haben. Hatten wir aber damals die Finger der linken Hand nehmen müssen, so werden wir jetzt, wegen des Lenzschen Gesetzes, die der rechten Hand anzuwenden haben. Wir halten also von der rechten Hand den Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Kraftlinien, den Daumen in die Richtung der Bewegung des induzierten Stromleiters, dann gibt der Mittelfinger die Richtung des entstehenden Induktionsstromes an. Diese Regel bezeichnet man als Rechte-Hand-Regel.

Fig. 201.



An dem einfachen Beispiel, das wir schon oben S. 182 zur Untersuchung der Bewegung benutzt haben, die ein Strom in einem magnetischen Feld erfährt, können wir unsere Regel leicht anwenden. Bewegen wir das Drahtstück M (Fig. 201) nach rechts durch das Magnetfeld, so ist der rechte Daumen nach rechts, der rechte Zeigefinger von unten nach oben zu halten, folglich geht der rechte Mittelfinger von hinten nach vorn und gibt uns die Richtung des dabei entstehenden Induktionsstromes an.

Diese Regel oder das Lenzsche Gesetz und ebenso eine weitere Regel, die wir bald kennen lernen werden, geben uns aber nur eben Aufschluß über die Richtung des entstehenden Induktionsstromes. Wir müssen uns aber auch über die Stärke und überhaupt über die genaueren quantitativen Gesetze dieser Erscheinungen informieren.

Immer, wenn Elektrizität durch einen Drahtkreis fließt, muß eine elektromotorische Kraft vorhanden sein, welche die Elektrizität eben in Bewegung setzt. Wir müssen daher auch hier, bei den Induktionsströmen, zuerst nach der elektromotorischen Kraft der induzierten Ströme fragen.

Zunächst scheint bei dieser Untersuchung eine Schwierigkeit darin zu liegen, daß wir es ja mit zweierlei, scheinbar verschiedenen Arten von Induktion, der Elektroinduktion und der Magnetoinduktion zu tun haben. Indes schon das Lenzsche Gesetz, das in beiden Fällen die Richtung des entstehenden Induktionsstromes in gleicher Weise auszudrücken lehrt, zeigt an, daß diese beiden Arten der Induktion auf eine und dieselbe Ursache zurückgeführt, also gleichartig behandelt werden können. In der Tat wissen wir ja bereits, daß ein Magnet und ein elektrischer Strom sich in der Beziehung ganz gleich verhalten, daß beide magnetische Kräfte ausüben.

Die magnetischen Kräfte eines Stromes sind es, ebenso wie die magnetischen Kräfte eines Magneten, welche die Induktionsströme in einem in der Nähe sich bewegenden Stromleiter hervorrufen. Dadurch sind die beiden Arten von Induktion auf dieselbe Erscheinung zurückgeführt; die Elektroinduktion ist ebenfalls eine Magnetoinduktion, indem nämlich die magnetischen Kräfte des primären Stromes die Induktion erzeugen.

Daraus folgt aber, daß wir am leichtesten und übersichtlichsten die quantitativen Verhältnisse der Induktionsströme werden darstellen können, wenn wir in allen Fällen Gebrauch machen von den magnetischen Kraftlinien, die ja sowohl in der Nähe eines Magneten, wie in der Nähe eines galvanischen Stromes vorhanden sind. Wenn sich ein Drahtstück in der Nähe eines Magneten bewegt, so durchschneidet es im allgemeinen immer die Kraftlinien desselben und ebenso, wenn es sich in der Nähe eines Stromkreises bewegt. Dieses Durchschneiden der Kraftlinien ist es, welches die Ursache für die Induktion ist. Wenn andererseits ein primärer Strom erst entsteht, so gehen von ihm aus die Kraftlinien nach außen und schneiden also wieder ein irgendwo in der Nähe befindliches Leiterstück. Wird umgekehrt der primäre Strom geöffnet, nachdem er bis dahin bestanden hat, so verschwinden die Kraftlinien; man kann sich vorstellen, daß sie allmählich von außen in den Stromkreis hineinrücken und dort aufhören; dabei schneiden sie also auch wieder ein in der Nähe befindliches Leiterstück. Kurz, in jedem Falle der Induktion finden wir, daß Kraftlinien die einzelnen Teile der induzierten Strombahn schneiden, indem sie entweder in der einen Richtung oder in der anderen Richtung durch die induzierten Leiter hindurchgehen.

Wenn wir einen Drahtkreis nehmen, dessen Enden mit einem Galvanometer verbunden sind, so können wir in diesem Draht auf verschiedenfache Weise Induktionsströme erzeugen und am Galvanometer beobachten. Jedes einzelne Stück des Drahtes wird dabei von Kraftlinien durchschnitten, bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne. Im ganzen treten dadurch in die von dem Drahtkreis umschlossene Fläche entweder Kraftlinien ein oder aus, es wird die Zahl der Kraftlinien, die die Fläche umfaßt, vermehrt oder vermindert. Die Geschwindigkeit, mit der diese Kraftlinienzahl sich ändert, diese ist es nun allein, welche die erzeugte elektromotorische Kraft bestimmt. Je größer die Kraftlinienzahl ist, die pro Sekunde in die Fläche hineintritt oder heraustritt, je größer also, wie wir es nennen wollen, die Geschwindigkeit ist, mit der die Kraft-

linienzahl in der Fläche sich vermehrt oder vermindert, um so größer ist die erzeugte elektromotorische Kraft der Induktion. Und dabei bringen austretende Kraftlinien immer einen Strom im Uhrzeigersinne hervor, wenn man den Drahtkreis in der Richtung der Kraftlinien ansieht, eintretende einen solchen im entgegengesetzten Sinne.

Aus diesem allgemeinen Gesetz folgt zunächst: je stärker der induzierende Magnet oder der induzierende Strom ist, um so größer ist bei sonst gleichen Verhältnissen die elektromotorische Kraft in der induzierten Spule. Denn in der Nähe eines stärkeren Magneten oder Stromes sind mehr Kraftlinien pro Quadratzentimeter vorhanden als bei schwächerem Magnete oder Strom.

Ferner folgt daraus: je rascher der primäre Strom oder Magnet in seiner Stärke oder in seiner Lage verändert wird, um so größer ist die elektromotorische Kraft des Induktionsstromes. Von dem Material des induzierten Drahtes ist sie ganz unabhängig. Je rascher, also auch je plötzlicher die Unterbrechungen eines primären Stromes stattfinden, um so größer wird die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes.

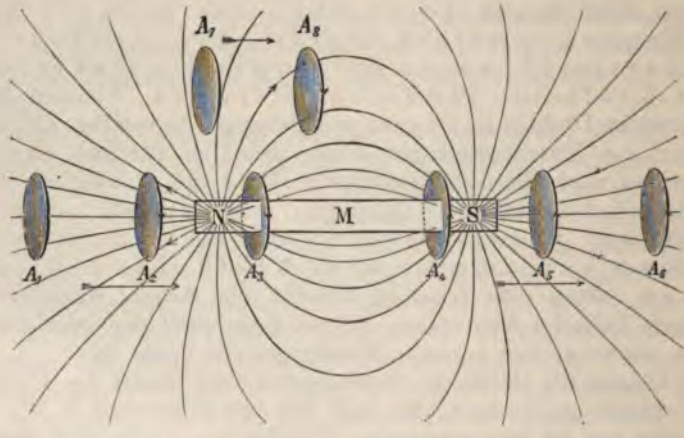
Und endlich drittens: je größer die Anzahl der Windungen der induzierten Spule ist, um so größer wird die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes. Denn jede Windung umfaßt eine Anzahl Kraftlinien und die gesamte Zahl der Kraftlinien, die pro Zeiteinheit ein- oder austreten, ist daher um so größer, je mehr Windungen die Spule hat.

Wir können die Größe der elektromotorischen Kraft des Induktionsstromes direkt gleichsetzen der Zahl der pro Zeiteinheit in die Fläche hinein- oder aus ihr herausgehenden Kraftlinien. Indes wäre diese Einheit für praktische Zwecke zu klein. Man ist daher übereingekommen, diejenige elektromotorische Kraft als Einheit zu nehmen, bei der nicht eine, sondern 100 Millionen (10^8) Kraftlinien in der Zeiteinheit in die Fläche ein- oder austreten. Diese Einheit ist gerade das Volt, das wir schon immer angewendet haben. Wir haben z. B. in Fig. 202 ein Bild der Kraftlinien eines Magnetstabes. Nehmen wir nun einen Drahtkreis, wie den bei A_1 gezeichneten, der eine bestimmte Fläche umschließt, und nähern wir ihn dem Nordpol bis A_2, so erkennt man, daß dabei mehr Kraftlinien durch ihn hindurchgehen als früher. An der Stelle A_1 durchsetzen drei Kraftlinien die Stromfläche, an der Stelle A_2 aber sechs. Wenn sich folglich die Stromfläche in 1 Sekunde von A_1 bis A_2 bewegen würde, so würde die elektromotorische Kraft durch die Zahl 3 ausgedrückt sein. Bewegt sich aber die Stromfläche in $\frac{1}{1000}$ Sekunde von A_1 bis A_2, so ist die elektromotorische Kraft durch die Zahl 3000 dargestellt. Nach unserer Festsetzung wäre in diesem zweiten Fall die elektromotorische Kraft 0,00003 Volt. Rückt die Fläche bis zum Nordpol N, so treten dabei am meisten Kraftlinien ein; rückt sie weiter, so nimmt die Induktion wieder ab und an der Stelle M bringt eine kleine Bewegung der Drahtfläche keine neuen Kraftlinien mehr hinein. Dort ist also der Induktionsstrom Null.

Bei weiterem Fortschreiten treten mehr und mehr Kraftlinien aus der Fläche aus. Der Induktionsstrom bekommt daher die entgegengesetzte Richtung, wie sich zeigt, wenn man den Drahtkreis von A_4 über A_5 nach A_6 schiebt. Ebenso kann man aus der Zahl der eintretenden Kraftlinien die Richtung und die Größe der elektromotorischen Kraft bestimmen, wenn die Fläche sich oberhalb oder unterhalb des Magnetes, wie von A_7 nach A_8, bewegt.

Dasselbe Verfahren findet auch bei der Elektroinduktion seine Anwendung. Denn da jeder Stromkreis mit magnetischen Kraftlinien behaftet ist, so schneidet der sekundäre Leiter, wenn er dem primären Strom sich nähert oder sich von ihm entfernt, die Kraftlinien desselben und da-

Fig. 202.



durch entsteht der Induktionsstrom. Wird der primäre Leiter unterbrochen, so verschwinden seine Kraftlinien, sie gehen also durch die Fläche des sekundären hindurch und erzeugen Induktion.

Um auch mittels der Kraftlinienvorstellung die Richtung des Induktionsstromes immer unzweifelhaft festzustellen, ist von Maxwell folgende Regel aufgestellt worden, die man die Maxwellsche Regel nennt: Man blicke auf die induzierte Spule immer in der Richtung der Kraftlinien (die vom Nordpol ausgehen und durch die Luft zum Südpol hingehen). Dann bringen austretende Kraftlinien immer einen Strom im Uhrzeigersinn, eintretende einen im entgegengesetzten Sinne hervor.

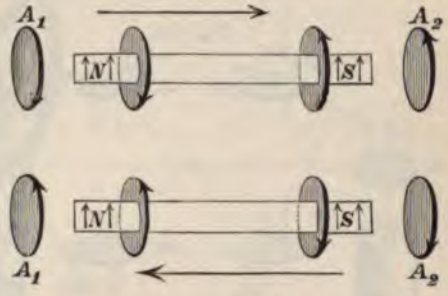
Vermittels der Betrachtung der Kraftlinien läßt sich nun in jedem Falle die Richtung des Induktionsstromes und die Größe der elektromotorischen Kraft bestimmen, die in einer Spule durch Bewegung induziert wird.

Wenn z. B. der Drahtkreis in Fig. 203 (oben) von der Stelle A_1 über den Magneten fortgezogen wird, bis zur Lage A_2, so ändert sich in der Mitte des Magneten die Richtung des Induktionsstromes; wird er dann, wie es in der unteren Figur gezeichnet ist, umgekehrt von A_2 wieder über

den Magneten fortgeschoben bis A_1, so erkennt man, daß bei dieser Hin- und Zurückbewegung 4 Induktionsströme von abwechselnd entgegengesetzten Richtungen entstehen. Die Ströme kehren sich um erstens auf jeder Seite des Magnetstabes, wenn der Drahtkreis, statt entfernt zu werden, vielmehr angenähert wird, zweitens über der Mitte des Magnetstabes.

Dasselbe findet statt, wenn der Drahtkreis fest bleibt und der Magnet durch ihn hindurchgezogen wird, nach der einen und anderen Richtung. Sobald seine Mitte den Drahtkreis passiert hat, wechselt der Strom in ihm die Richtung und ebenso, wenn er seine Bewegung umkehrt.

Fig. 203.



Wir sind also jetzt im stande, durch einfache Bewegung einer Drahtspule in der Nähe von Magneten oder von Magneten in der Nähe von Drahtspulen elektrische Ströme zu erzeugen, ganz ohne Anwendung von galvanischen Elementen. Direkt allerdings bekommen wir immer Ströme von fortwährend wechselnder Richtung, aber es wird uns möglich sein, diese Ströme durch Zuhilfenahme eines passend eingerichteten Kommutators in Ströme von konstant bleibender Richtung umzuwandeln. Wenn wir z. B. in Fig. 204 in d einen Magneten haben, der in N seinen Nordpol, in S seinen Südpol hat, und wenn wir jedem dieser Pole eine Drahtspule gegenüberstellen, die auf einen gebogenen Zylinder K aus weichem Eisen, den K e r n, aufgeschoben sind, so können wir durch Umdrehung dieser Spulen vor den Magnetpolen Wechselströme in jeder von ihnen erzeugen. Der Draht auf den beiden Spulen ist zusammenhängend. Wenn die eine Spule A sich von dem Nordpol N entfernt, entfernt sich die andere B zu gleicher Zeit von dem Südpol S. Damit nun diese Ströme sich in den Spiralen nicht entgegenwirken, sondern zusammensetzen, müssen die Windungen der Spiralen zweckmäßig ineinander übergehen, nämlich so, daß die beiden Schenkel in entgegengesetzter Richtung mit dem Draht umwickelt sind.

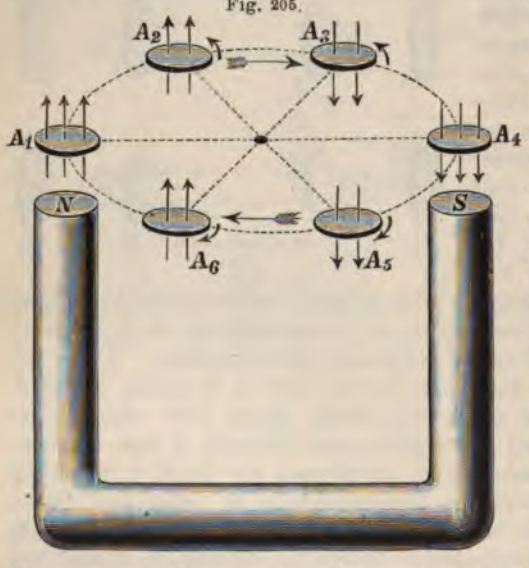
Fig. 204.

Sobald nun die beiden Drahtspulen sich zusammen bewegen, tritt in beiden die Induktion in Wirksamkeit, es werden in beiden Spulen elektromotorische Kräfte erregt, die sich addieren, und wenn die Enden der Spulen durch einen äußeren Stromkreis verbunden sind, so fließt durch das ganze System ein Induktionsstrom. Dabei ist es ganz gleich, ob der Magnet fest ist und die Spulen sich drehen, oder ob die Spulen festgehalten werden und der Magnet in Drehung versetzt wird.

Wir wollen die Richtung des Induktionsstromes und die Größe der elektromotorischen Kraft zu bestimmen suchen, wenn der Kern mit den

Spulen sich vor dem feststehenden Magneten dreht. Dabei brauchen wir bloß eine von den Spulen, etwa A, zu betrachten, da die andere so mit ihr verbunden ist, daß die beiden induzierten Ströme in gleichem Sinne verlaufen. Die Kraftlinien gehen vom Nordpol N aus nach allen Seiten in die Luft und gehen zum Südpol S hin. Es möge sich die Spule A in der Richtung des Uhrzeigers wie in Fig. 205 bewegen. Wenn die Spule in der Lage A_1, über dem Pole N steht, gehen alle Kraftlinien des Poles durch sie hindurch; fängt sie an, sich fortzubewegen, so treten mehr und mehr Kraftlinien aus ihr heraus, also fließt, nach der Maxwellschen Regel (S. 216), in der Richtung der Kraftlinien gesehen, der Strom in ihr im Sinne des Uhrzeigers. Ist die Spule bis A_2 gekommen, so ist nach der Zeichnung eine Kraftlinie aus ihr ausgetreten, von unten gesehen fließt also der Strom in der Uhrzeigerrichtung, also von oben gesehen entgegengesetzt, wie der Pfeil bei A_2 zeigt. Geht die Spule weiter bis A_3, also über die Mitte ihres Weges, so dringen wieder immer mehr Kraftlinien in sie hinein, aber von oben, so daß also von oben gesehen der Strom umgekehrt wie ein Uhrzeiger, d. h. von unten gesehen immer noch wie der Uhrzeiger fließt. Daraus folgt, daß sich die Richtung des Stromes auf dem ganzen Wege von A_1 über A_2 und A_3 bis A_4 nicht ändert, wenn die Spule vom Nordpol zum Südpol sich dreht. Dreht sie sich aber weiter von A_4 über A_5 und A_6, so dringen die von oben hereinkommenden Kraftlinien seitlich heraus und zugleich dringen von unten immer neue herein, so daß auf dem Weiterweg der Strom umgekehrt wie der Uhrzeiger fließt, während sich die Spule von S im Sinne des Uhrzeigers nach N dreht. Die Umkehrung des Stromes findet also statt, während die Spule gerade über den Polen sich vorbeibewegt. Am größten ist die elektromotorische Kraft und daher auch der Strom dann, wenn die Spulen gerade um 90^0 von den Polen entfernt sind. Denn dort treten bei der Bewegung von unten die Kraftlinien aus, von oben die Kraftlinien ein, und wir haben gesehen, daß diese zusammenwirken. Bei jeder halben Umdrehung des Magnetes oder des Kernes mit den Drahtspulen wird also die Richtung des Induktionsstromes in ihnen verändert. Die Spulen und der sie verbindende Draht werden von Wechselströmen durchflossen.

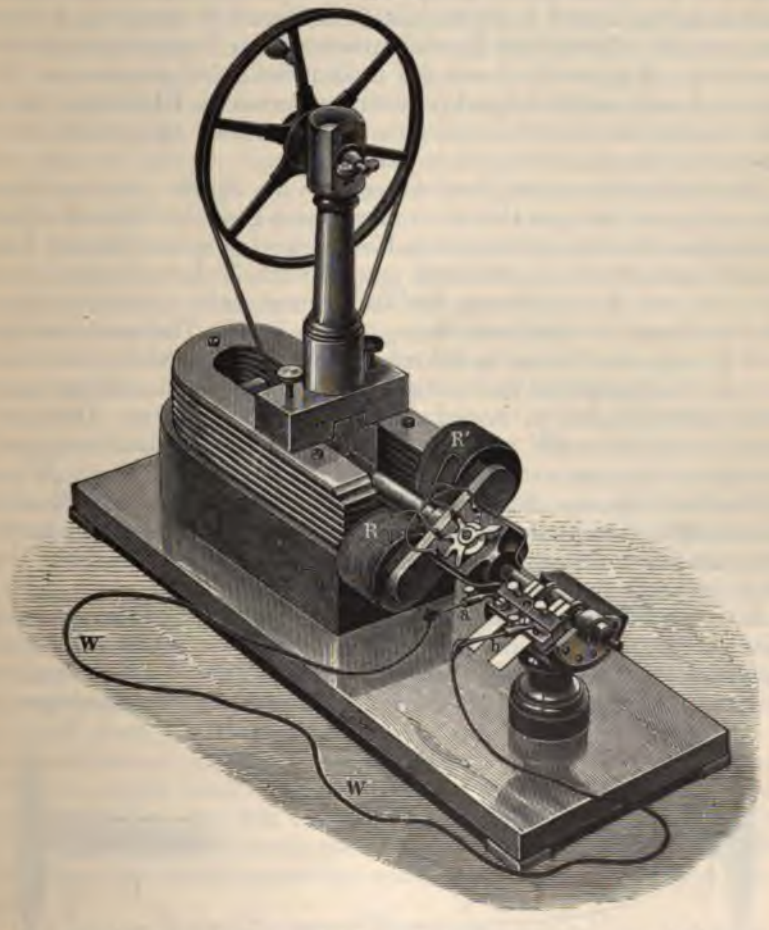
Fig. 205.



Die Einrichtung, die hier schematisch beschrieben wurde, ist nun in ähnlichen Formen vielfach wirklich ausgeführt. In dem Apparat in

Fig. 206 z. B. liegt ein kräftiger Magnet auf einer Unterlage, und vor seinen Polen werden zwei Spulen R und R′, die auf Eisenkernen aufsitzen, vermittels eines Rades in rasche Rotation versetzt. Man nennt sie zuweilen Induktorrollen. Um von den beiden Enden des Drahtes dieser Rollen den Strom nach außen durch einen beliebigen Draht WW leiten zu können, werden diese Enden in zwei voneinander isolierte Ringe

Fig. 206.



auf der metallischen Achse geführt, welche also mit der Achse und mit den Spulen sich drehen. Auf diesen Ringen schleifen nun zwei Metallfedern a und b, welche also immer mit den Enden der Spulen in Verbindung sind. Sie bilden dadurch die festen Enden der beweglichen Spulendrähte.

Verbindet man diese Schleiffedern durch irgend einen Leiter w w, einen Apparat oder auch durch den menschlichen Körper, so fließen durch diesen Leiter die Wechselströme hindurch, die in den beweglichen Spulen erzeugt werden.

Man nennt eine solche Maschine eine magnetelektrische Maschine.

Jedesmal, wenn die beiden Spulen eine halbe Umdrehung gemacht haben, entsteht ein Strom von entgegengesetzter Richtung, da das eine Mal der positive Stromimpuls nach a, das andere Mal nach b hin gerichtet ist. Wenn man es nun aber einrichtet, daß immer, wenn die Achse halb umgedreht wird, auch ein Kommutator umgelegt wird, durch den der Strom von den Spulen zuerst geführt wird, so ist klar, daß dann durch den Draht zwischen a und b die Ströme fortwährend in derselben Richtung fließen müssen. Ein solcher Kommutator ist in der Tat an dieser Maschine angebracht. Man erhält durch ihn in dem Schließungskreise eine große Menge von aufeinanderfolgenden Strömen derselben Richtung, die von einem kontinuierlichen Strom nicht zu unterscheiden sind, wenn nur die Rotation der Drahtspulen eine sehr rasche ist.

Die bloße Aufwendung von Arbeit, um die Spulen vor den Magnetpolen zu drehen, hat uns also hier in den Stand gesetzt, elektrische Ströme zu erzeugen. In den galvanischen Ketten wird, wie wir gesehen haben, die elektrische Strömung dadurch erzeugt, daß Zink in ihnen aufgelöst wird. Die bei der Auflösung des Zinks entwickelte chemische Energie setzt sich direkt in elektrische Energie um. In den Thermosäulen haben wir die Energie der Wärme in elektrische Energie verwandelt. Jetzt haben wir direkt die Energie der Bewegung, die Arbeit, die wir zum Drehen unserer Spulen verwendet haben, in elektrische Energie umgesetzt. Dies ist der Punkt, an welchem die moderne Elektrotechnik mit Macht angegriffen hat und von dem aus sie ihre glänzenden Resultate erlangt hat. Wie sich die Entwickelung von dieser ersten, noch ziemlich primitiven Maschine, welche Arbeit in elektrische Energie verwandelt hat, bis zu den heutigen Riesenmaschinen gestaltet hat, werden wir im zweiten Abschnitt dieses Buches besprechen.

Eine jede Veränderung in der Lage und Stärke eines galvanischen Stromes oder in der Lage und Stärke eines Magneten erzeugt in einem in der Nähe befindlichen Drahtkreise einen Induktionsstrom. Bisher hatten wir immer einigermaßen erhebliche Veränderungen der

Fig. 207.

Lage oder Stärke angenommen. Diese Wirkung geht aber bis zu den allerkleinsten Veränderungen. Das wunderbarste und am genialsten ausgedachte Beispiel dieser induzierenden Wirkung ist das Bellsche Telephon. Die Wirkungsweise desselben wird aus der schematischen Fig. 207 klar hervorgehen. In dieser Figur sind zwei Stahlmagnete NS *und* $N_1 S_1$ an ihren Nordpolen N und N_1 mit einem Draht umwickelt,

der die beiden Magnete miteinander verbindet. Vor jedem Nordpole steht in der Nähe eine dünne Platte aus weichem Eisen. In diesen wird durch die Wirkung der Magnete je ein Südpol s und s' auf der den Magneten zugewendeten Seite induziert. Drückt man nun die eine Eisenplatte, z. B. s, ein wenig mit der Hand ein, so wird der Südpol dadurch dem Magneten und der diesen umgebenden Spirale genähert. Infolgedessen entsteht in dieser Spirale ein Induktionsstrom, welcher sich durch den Draht zu dem anderen Nordpol N_1 fortpflanzt und diesen, da er umgekehrt wie der Zeiger einer Uhr um ihn fließt, verstärkt. Dadurch wird aber nun die Platte s', infolge der stärkeren Wirkung des Nordpols N_1, ein wenig an N_1 angezogen. Im Moment also, wo man s ein wenig gegen N herandrückt, wird s' ein wenig gegen N_1 herangezogen. Hätte man s ein wenig von N entfernt, so würde auch s' sich sofort von N_1 entfernen. Einer jeden noch so kleinen Bewegung von s entspricht also eine ebensolche Bewegung von s'. Wenn man nun gegen die Platte s spricht, so wird diese dadurch in sehr kleine Bewegungen, in sehr kleine Schwingungen versetzt. Jede Schwingung erzeugt einen Induktionsstrom und daher dieselbe Schwingung an der Platte s'. Diese Schwingungen der Platte s' teilen sich dann der Luft mit und so hört man in s' das, was in s hineingesprochen wurde. Wir werden im zweiten Teile Gelegenheit haben, uns mit der spezielleren Einrichtung des Telephons und mit den an diesem Schema angebrachten Verbesserungen näher zu beschäftigen.

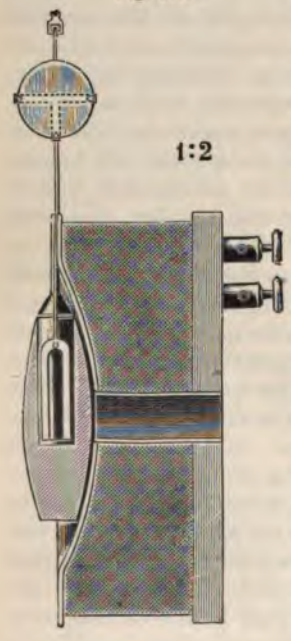
Ebenso wie in Drähten entstehen auch in ausgedehnten Metallmassen Induktionsströme durch Bewegung von Magneten oder Strömen. Wenn man z. B. eine kupferne Scheibe, wie es A r a g o getan hat, rasch um ihre Achse dreht und über derselben eine Magnetnadel fest aufstellt, so werden durch diese Bewegung der Kupferscheibe bei den Magnetpolen vorbei in der Scheibe Induktionsströme erzeugt. Die Richtung der Ströme ist dabei nach dem Lenzschen Gesetz wieder die, daß diese durch ihre elektromagnetische Wirkung die Scheibe in der entgegengesetzten Wirkung forttreiben würden. Entfernt sich also z. B. in einem Moment ein Punkt der Scheibe von dem Nordpol der Magnetnadel, so würde diese elektromagnetische Wirkung diesen Punkt dem Nordpol zu nähern suchen. Daraus folgt, daß wenn die Magnetnadel nicht fest, sondern drehbar über der Scheibe aufgehängt ist, daß sie unter dem Einfluß dieser Kräfte der Rotation der Scheibe folgen muß. Der Nordpol der Nadel muß eben dem Punkt der Scheibe folgen, der sich von ihm entfernt, aber sich ihm nähern will. Es hat Arago diese Erscheinung zuerst beobachtet, aber erst durch Faradays Entdeckung der Induktionsströme wurde sie auf ihre Grundlage zurückgeführt.

Eine andere Folgerung dieser Erscheinung hat bei der Konstruktion von Galvanometern eine wichtige Anwendung gefunden. Wenn eine Magnetnadel in einem metallenen Gehäuse schwingt, so werden in diesem Metall ebenfalls Induktionsströme erregt und durch die elektromagnetische Anziehung wirken diese der Bewegung der Magnetnadel entgegen. Die Magnetnadel hört infolgedessen bald auf zu schwingen, ihre Schwingungen werden rasch g e d ä m p f t. Man umgibt deshalb, wie wir S. 189 gesehen haben, bei vielen Galvanometern den Magneten mit einer solchen dämpfenden Kupferhülse und hat dadurch den Vorteil, daß die Nadel

des Galvanometers sich rasch in ihre bestimmte Stelle begibt, ohne lange hin und her zu schwingen. Fig. 208 zeigt z. B. den Durchschnitt eines solchen Kupferdämpfers in dem oben (S. 189) abgebildeten Galvanometer von Hartmann & Braun. Man sieht den Glockenmagnet in dem Hohlraum einer Kupfermasse befindlich. Oben ist der Spiegel zu sehen, durch den die Bewegungen beobachtet werden, rechts ist der Durchschnit der Multiplikatorwindungen gezeichnet.

Allgemein nennt man die Ströme, die durch Induktion in ausgedehnten Metallmassen entstehen, (mißbräuchlich) Foucaultsche Ströme oder jetzt besser Wirbelströme. Diese Wirbelströme sind häufig störend, besonders bei der Konstruktion von elektrischen Maschinen, weil zu ihrer Erzeugung ein gewisser Aufwand von Arbeit gehört, der aber nutzlos verbraucht wird, und weil diese Ströme sich nach dem Jouleschen Gesetz in Wärme umsetzen und schädliche Erhitzungen hervorbringen. Man hat deshalb bei den technischen elektrischen Maschinen sich bemüht, diese Wirbelströme zu verhindern oder wenigstens abzuschwächen. Dieselben entstehen dort gerade in denjenigen magnetischen Eisenmassen, welche die wirksamen induzierten Drähte tragen. Um diese Ströme zu verhindern, ist es notwendig, diese ausgedehnten Metallmassen in denjenigen Richtungen zu unterbrechen, in welchen die Wirbelströme fließen würden. Man macht deshalb Eisenkörper, in welchen Wirbelströme entstehen könnten, nicht aus einem massiven Stück, sondern setzt sie aus einer großen Reihe von einzelnen Eisenstücken zusammen, so daß in der Richtung der Wirbelströme keine zusammenhängende metallische Bahn vorhanden ist. Gewöhnlich nimmt man oxydierte Eisendrähte oder auch isolierte Eisenscheiben zur Konstruktion von solchen Metallmassen.

Fig. 208.



Die Induktionsströme, die durch Öffnen und Schließen eines primären Stromes entstehen, werden viel stärker, wenn man in die primäre Drahtspule einen Eisenkern hineinbringt und dann den Strom abwechselnd schließt und öffnet. Denn dann erhält man nicht nur die Induktionsströme von dem entstehenden und vergehenden Strom, sondern auch die Induktionsströme von dem entstehenden und vergehenden Magnetismus innerhalb der induzierenden Spule, und diese wirken zusammen, verstärken sich und machen daher die Induktionswirkungen viel kräftiger und stärker. Wenn man also in die primäre Spule einen Kern von weichem Eisen hineinbringt, so wird die induzierende Wirkung der primären Spule außerordentlich vergrößert. Nach dem über die Wirbelströme eben Gesagten nimmt man aber nicht einen massiven Eisenkern, sondern ein Bündel oxydierter Eisendrähte.

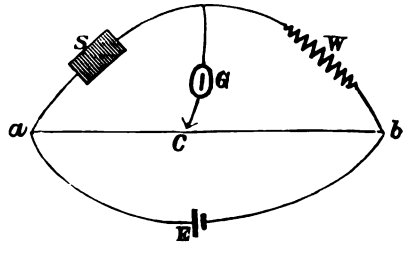
Mit den beiden bisher besprochenen Arten der Induktion, der Magneto-

induktion und Elektroinduktion, sind aber die Induktionserscheinungen noch nicht erschöpft. Es gibt noch eine dritte, besonders wichtige und interessante Art von Induktion, die ebenfalls von Faraday entdeckt wurde, die Selbstinduktion.

Ganz ebenso nämlich, wie ein galvanischer Strom bei seinem Entstehen und Verschwinden in einem in seiner Nähe befindlichen Drahtkreis Induktionsströme erzeugt, ganz ebenso erzeugt er auch in seiner eigenen Bahn derartige Ströme. Am einfachsten läßt sich diese Tatsache einsehen, wenn man einen spiralförmig gewundenen Draht nimmt und den Strom von einem galvanischen Element durch ihn hindurchsendet. Es fließt dann der Strom durch lauter parallel nebeneinander liegende Windungen. In dem Moment nun, wo der Strom unterbrochen wird, wird von jeder Windung auf die anderen Induktion ausgeübt; ebenso wird im Moment, wo der Strom geschlossen wird, auch in allen Windungen Induktion erregt. Man nennt diese Induktionsströme in der eigenen Bahn eines Stromes Extraströme. Beim Schließen eines Stromes fließt der erzeugte Extrastrom in entgegengesetzter Richtung durch die Spirale wie der ihn erzeugende primäre Strom. Der beim Schließen entstehende Extrastrom schwächt also den eigentlichen Strom. Daher kommt ein jeder Strom, wenn er geschlossen wird, nicht sofort zu seiner vollen Stärke, sondern erlangt diese erst allmählich, allerdings in sehr kurzer Zeit. Er kommt nämlich erst dann zu seiner vollen Intensität, wenn der Schließungsextrastrom abgelaufen ist, seine Intensität wächst allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Werte. Beim Öffnen dagegen, wenn der Strom in einer Leitung unterbrochen wird, sucht der entstehende Öffnungsextrastrom in derselben Richtung zu fließen, wie der ursprüngliche Strom. Da der ursprüngliche Strom aber schon unterbrochen ist, so findet der Öffnungsstrom hier, in diesem einfachen Fall, keinen Weg mehr durch den Draht, ein eigentlicher Öffnungsextrastrom kommt also gar nicht zu stande. Trotzdem aber ist eine Tendenz für den Öffnungsstrom, eine elektromotorische Kraft vorhanden, welche unter geeigneten Umständen auch wirklich den Strom zum Fließen bringen kann.

Es ist zuerst nicht leicht, sich von dem Vorhandensein dieser Extraströme, die durch Selbstinduktion entstehen, eine klare Vorstellung zu verschaffen. Am einfachsten kann man sie, wenigstens den Öffnungsextrastrom, experimentell auf folgende Weise erkennen. Man nimmt eine Spule mit vielen Windungen (in einer solchen werden die Extraströme, wie wir sehen werden, recht stark) und schaltet sie in einen Zweig einer Wheatstoneschen Drahtkombination ein, wie in Fig. 209. S sei diese Spule, E sei das galvanische Element, a b ein ausgespannter Draht, W der Vergleichswiderstand, G sei ein empfindliches ballistisches Galvanometer (S. 196) in der Brücke. Dann wissen wir, daß wir durch Verschieben des Kontaktes C auf der Brücke eine Stelle finden können, bei welcher das Galvanometer in der Brücke ganz

Fig. 209.



stromlos ist. Die ganze Drahtkombination wird von Strömen durchflossen, nur die Brücke ist ohne Strom, und zwar ist die Stellung von C nur abhängig von dem Verhältnis der Widerstände der vier Seitenzweige S, W, a C, b C, gar nicht von der elektromotorischen Kraft des Elementes E. Man kann also kleine oder große elektromotorische Kräfte in E einschalten, ohne daß das Galvanometer einen Ausschlag macht, wenn es einmal auf Stromlosigkeit eingestellt ist. Wenn man nun aber, und das ist das Experiment, das den Extrastrom beweist, den Hauptstromkreis E a b öffnet, so sieht man die Nadel des Galvanometers einen plötzlichen Ausschlag machen und dann wieder in die Ruhelage zurückkehren. Dieser Nadelausschlag beweist, daß durch das Galvanometer ein momentaner Strom gegangen ist, und dieser rührt her von der Selbstinduktion in der Rolle S. Durch das Aufhören, Öffnen des primären Stromes in S ist eine elektromotorische Kraft der Selbstinduktion entstanden, welche durch S selbst und durch alle mit ihm verbundenen Leiter, also auch durch G, einen momentanen Strom sendet.

Wir können sogar, wenn wir dieses Experiment anstellen, noch mehr als bloß qualitativ das Vorhandensein des Öffnungsextrastromes erkennen, wir können auch, indem wir Spulen von verschiedener Größe und Form an die Stelle von S bringen, quantitativ bestimmen, wie die Größe der erzeugten elektromotorischen Kraft sich bei verschiedenen Spulen ändert. Tut man dies, so findet man zunächst, daß der Widerstand der Spule S nicht in Betracht kommt. Denn wenn man einen und denselben Draht das eine Mal frei ausgespannt, das andere Mal zu einer Spirale gewickelt an die Stelle S bringt, so findet man unter sonst gleichen Umständen den Ausschlag des Galvanometers das zweite Mal bedeutend größer, hundert- und tausendemal so groß wie im ersten Fall. Da der Widerstand des Drahtes in beiden Fällen derselbe ist, so sieht man, daß die F o r m des Drahtes eine wesentliche Rolle für die Größe des Extrastromes spielt. Verschiedene Rollen unterscheiden sich also dadurch, daß sie je nach ihrer Form, ob sie eng oder weit, lang oder kurz sind, viele oder wenige Windungen haben, unter sonst gleichen Umständen verschiedene Extraströme erzeugen.

Und das ist ohne weiteres einzusehen. Denn die elektromotorische Kraft der Extraströme hängt, wie die aller anderen Induktionsströme, ab von der Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinienzahl in der betreffenden Fläche sich ändert. Je rascher, je plötzlicher also einerseits die primäre Intensität sich ändert, um so stärker ist die elektromotorische Kraft, die Spannung des Extrastromes. Bei gleicher Änderung der Stromstärke wird aber die elektromotorische Kraft um so größer, je mehr Windungen die induzierte Spule hat, weil durch jede Windungsebene die Kraftlinien hindurchgehen. Daraus folgt, daß das Verhältnis, in welchem die erzeugte elektromotorische Kraft des Extrastromes zu der Geschwindigkeit steht, mit der die Stromstärke sich in der Spule ändert, daß dieses Verhältnis allein abhängig von der Windungszahl und Größe, also von der Form der Spule ist. Man nennt dieses Verhältnis den K o e f f i z i e n t e n d e r S e l b s t i n d u k t i o n oder das S e l b s t p o t e n t i a l der betreffenden Spule. Das Selbstpotential einer Spule ist eine Größe, die, ebenso wie der Widerstand eines Drahtes, nur von der Form, der Länge,

dem Querschnitt, der Windungszahl der Spule, also nur von geometrischen Größen, gar nicht von der durch die Spule gehenden Stromstärke abhängt. Das Selbstpotential hängt aber, anders wie der Widerstand, nicht ab von dem Material des Drahtes. Für Kupfer-, Messing-, Aluminiumdrähte u. s. w. ist es unter sonst gleichen Umständen ganz dasselbe. Nur Eisendrähte machen wegen ihres stark magnetischen Charakters davon eine Ausnahme. Es besteht immer der Zusammenhang:

Elektromotorische Kraft des Extrastroms = Selbstpotential × Geschwindigkeit der Intensitätsänderung.

Man mißt das Selbstpotential von Drähten in einer bestimmten Einheit, welche man 1 Henry nennt. Wenn nämlich die Geschwindigkeit, mit der der Strom in einer Spule sich ändert, so groß ist, daß in jeder Sekunde sich die Stromstärke gerade um 1 Ampere ändert, so werden in Spulen verschiedener Form die dadurch entstehenden Extraströme verschiedene elektromotorische Kraft haben. Eine Spule nun, in welcher die dann entstehende elektromotorische Kraft gerade 1 Volt ist, soll nach dieser Festsetzung gerade die Einheit des Selbstpotentials, 1 Henry, haben. Daraus folgt, daß für die Einheiten dieselbe Gleichung gilt

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Henry} \times \frac{1 \text{ Ampere}}{1 \text{ Sekunde}}.$$

Übrigens ist diese Einheit für die praktisch vorkommenden Fälle gewöhnlich zu groß und man nimmt deswegen den tausendsten Teil derselben als Einheit an und bezeichnet ihn als 1 Millihenry. Um einen ungefähren Begriff von der Größenordnung des Selbstpotentials von Spulen zu bekommen, kann folgende Angabe dienen. Ein Solenoid mit einer Drahtlage hat, wenn es 1 qcm Querschnitt und 1 m Länge besitzt und wenn auf ihm 1000 Drahtwindungen liegen, ein Selbstpotential von ungefähr 0,12 Millihenry; hat es 10 Drahtlagen von je 1000 Windungen, so ist das Selbstpotential auch ungefähr 10mal so groß.

Das Selbstpotential von Drahtrollen oder Drahtstücken ist also eine Größe, welche nur von der Form und Größe der Rolle abhängt. Man kann daher auch Einheitsrollen für das Selbstpotential herstellen, indem man Drahtrollen so abmißt, daß ihr Selbstpotential gerade 1 Henry oder 1 Millihenry u. s. w. ist. Bei der praktischen Herstellung solcher „Normalen für die Selbstinduktion“ muß man darauf achten, daß die Form der Drahtrolle unveränderlich bleibt — möglichst auch bei Temperaturänderungen —, weil diese Form den Wert des Selbstpotentials wesentlich beeinflußt. Man windet daher Drähte aus Metall oder besser Metalllitzen auf isolierende Steinrollen (Serpentin) auf und schließt sie in Stein ein. Eine solche Einheitsrolle für 1 Henry, wie sie von Siemens & Halske konstruiert wird, zeigt Fig. 210. Mit solchen Einheitsrollen, die von 1 Henry bis zu 0,1 Millihenry hergestellt werden, versehen, kann man leicht das

Fig. 210.

Selbstpotential jeder Rolle experimentell bestimmen. Eine einfache, dafür geeignete Methode werden wir im Kapitel 10 (Wechselströme und Drehströme) beschreiben. Je größer das Selbstpotential eines Leiters ist, um so größere elektromotorische Kraft haben die Extraströme, die in ihm bei Stromänderungen entstehen, um so stärker gespannt sind sie; je geringer das Selbstpotential ist, um so geringer. Spiralen haben großes Selbstpotential, gerade ausgespannte Drähte sehr geringes.

Um daher die Extraströme in einem Draht, auch wenn er lang ist und daher großen Widerstand besitzt, möglichst schwach zu machen, muß man sein Selbstpotential möglichst klein machen. Bei einer Drahtspule kann man das dadurch bewirken, daß man den Draht bifilar wickelt, wie es Fig. 211 zeigt. Man biegt den Draht in der Mitte um und windet ihn nun so auf, daß die beiden Hälften immer nebeneinander liegen. Dann fließt offenbar der Strom in je zwei benachbarten Windungen immer nach der entgegengesetzten Richtung, und daher heben sich die Extraströme in den einzelnen Windungen gegenseitig auf. Eine solche Drahtrolle nennt man eine induktionsfreie oder bifilar gewickelte Drahtrolle. In den Widerstandskästen, die wir in Kapitel 4 besprochen haben, sind die Drahtrollen immer bifilar gewickelt.

Fig. 211.

Will man umgekehrt die Extraströme in einem Draht möglichst stark machen, so muß man sein Selbstpotential möglichst groß machen, auch wenn er selbst nur einen kleinen Widerstand besitzt. Das kann man erreichen, wenn man diesen Draht um einen Kern aus weichem Eisen herumwindet. Dadurch werden nämlich, bei gleicher Änderung der Stromstärke, die Extraströme sehr stark, weil der Magnetismus des Eisens dabei mit verändert wird und dadurch auch wieder induzierend wirkt. Eine Rolle, die kleinen Widerstand, aber dadurch, daß sie eben einen Kern von weichem Eisen hat, große Selbstinduktion besitzt, bezeichnet man häufig als Drosselspule. Eine Drosselspule ist also nichts anderes als ein Elektromagnet mit geringem Widerstand der Umwindung. Solche Drosselspulen besitzen unter Umständen brauchbare Anwendungsfähigkeit, worauf wir in den folgenden Kapiteln zu sprechen kommen werden, wobei sich auch ihr Name erklären wird.

Die Extraströme spielen bei allen veränderlichen Strömen eine sehr wichtige Rolle und wir werden in den beiden folgenden Kapiteln uns noch viel mit ihnen zu beschäftigen haben. Wir hatten das Gesetz gefunden, daß in einer Spule der Extrastrom eine um so höhere elektromotorische Kraft, um so höhere Spannung hat, je rascher die Intensität des primären Stromes sich ändert. Nun sieht man ohne weiteres, daß infolgedessen die Schließungs- und die Öffnungsextraströme sich nicht gleich verhalten können. Bei der Schließung eines Stromes wächst, wie oben erwähnt, die Stromstärke allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Endwert. Die Änderung der Stromstärke ist also keine plötzliche, sondern eine allmähliche und daher hat der Schließungsextrastrom eine verhältnismäßig geringe Spannung. Anders ist es bei der Öffnung eines Stromes. Gerade im Moment vor der Öffnung hat der primäre Strom noch seine volle Stärke und gleich darauf ist die Stromstärke gleich Null geworden. Die

Änderung der Stromstärke bei der Öffnung eines Stromes ist daher eine sehr rasche, plötzliche, und daher folgt, daß der Öffnungsextrastrom eine sehr hohe Spannung haben muß, eine viel höhere als der Schließungsextrastrom. Dies ist nun auch in der Tat der Fall. Der Öffnungsstrom ist so hoch gespannt, daß er die Luftschicht zwischen den beiden Leitern, durch deren Trennung der Strom geöffnet ist, in einem Funken durchbricht. Obwohl er also keinen geschlossenen Weg durch den Draht mehr findet, fließt er doch und zwar durch die Luftschicht zwischen den Unterbrechungsstellen. Öffnet man z. B. einen Strom dadurch, daß man einen Draht aus einem Quecksilbernapf herausnimmt, so wird der Öffnungsstrom so stark gespannt, daß ein heller Funke zwischen dem Quecksilber und dem Draht überspringt. Allgemein erhält man immer beim Öffnen eines nicht zu schwachen Stromes Funken, die man Öffnungsfunken nennt.

Eine weitere Folge dieser Verschiedenheit in dem Anwachsen und Abnehmen eines Stromes ist die, daß auch in einer von diesem Strom induzierten sekundären Spule die Öffnungsströme ebenfalls stärker gespannt sein werden, höhere elektromotorische Kraft haben müssen als die Schließungsströme. Die Schließung des primären Stromes geht eben allmählich vor sich, weil der Extrastrom entgegenfließt, während die Öffnung rasch und plötzlich vor sich geht. Daher ist allgemein die Spannung von Öffnungsströmen eine viel höhere als die von Schließungsströmen.

Nachdem wir so die Eigenschaften und Gesetze der Induktionsströme, seien sie nun durch Magneto-, Elektro- oder Selbstinduktion entstanden, kennen gelernt haben, wird es nicht schwer sein, eine genaue Kenntnis von Apparaten uns zu bilden, die eine große Bedeutung in der Wissenschaft und Technik haben, nämlich von den Induktionsapparaten oder Transformatoren.

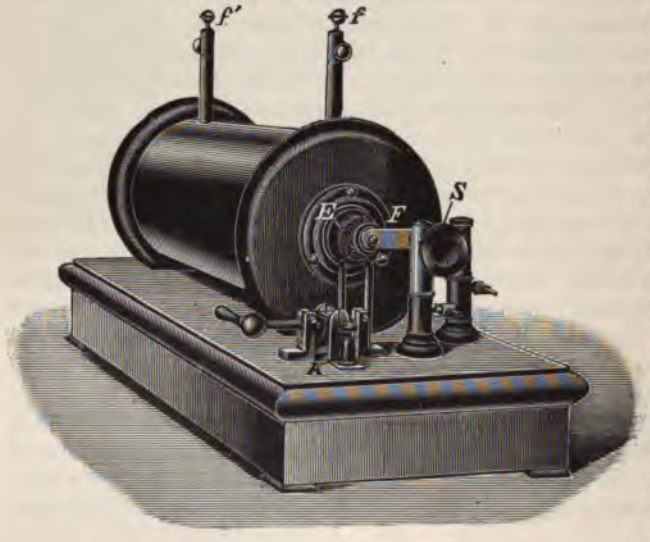
Wir sahen, daß wenn wir über eine primäre Spule eine sekundäre bringen, daß dann bei jeder Unterbrechung und Schließung des primären Stromes in jeder Windung der sekundären Spule eine elektromotorische Kraft erzeugt wird. Je größer also die Zahl der Windungen auf der sekundären Spule ist, um so größer wird die erzeugte Spannung des Induktionsstromes.

Durch Vergrößerung der Windungszahl der induzierten Spule kann man also die elektromotorische Kraft der Induktionsströme außerordentlich steigern, auf viele Zehntausende von Volt bringen, da eben jede Windung dann die Kraftlinien schneidet und induziert wird. Man kann so von einem primären Strom mit geringer elektromotorischer Kraft, etwa 10—20 Volt, leicht einen sekundären Strom mit sehr großer elektromotorischer Kraft, 100 000 Volt, erzeugen. Die Apparate, welche dieses leisten, nennt man speziell Induktionsapparate.

Ein solcher Induktionsapparat (von Ernecke, Berlin) ist in Fig. 212 gezeichnet. Das Schema desselben ist in Fig. 213 angegeben. Man sieht in diesem letzteren eine Drahtspule aus dickem Draht, A, die über einen Eisenkern M N gewickelt ist, welcher selbst aus einem Bündel Eisendrähte besteht. Dieses ist die primäre Spule. Um sie ist die äußere Spule, die nicht gezeichnet ist, isoliert herumgewickelt. Sie ist die induzierte Spule und besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes. In Fig. 212 sieht man nur den Eisenkern E, die beiden Spulen sind von

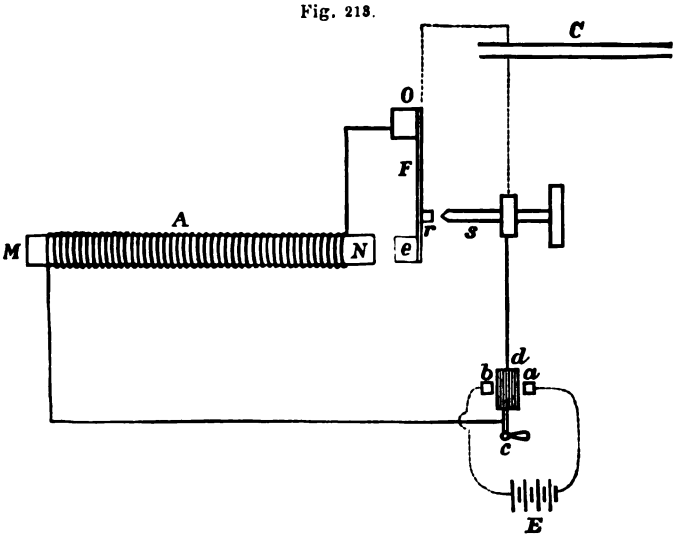
einer Ebonithülle umgeben. Der primäre Strom geht (Fig. 213) von der Batterie E zunächst zu den Mittelklemmen a und b eines Kommutators, wie des in Fig. 63 gezeichneten, und von den Endklemmen c und d geht er zur primären Spule, aber durch einen Unterbrecher, einen Neefschen Hammer, hindurch. Dieser besteht hier einfach aus einer Feder F, die an einem Fuß O befestigt ist und die ein Eisenstück e gerade dem Eisenkern N gegenüber trägt. Andererseits trägt sie ein Platinstück r, welches gegen die Spitze s, die verstellbar ist, sich anlegen oder von ihr sich fortbewegen kann. Liegen s und r aneinander an, so ist der Strom geschlossen, die Feder wird von dem Eisenkern angezogen, dadurch der Strom unterbrochen u. s. f. In Fig. 212 sieht man auch den Kommutator K und die Feder F des Unterbrechers, sowie die Schraube S, durch die die Spitze gegen das Kontaktstück bewegt werden kann. Die induzierte Spule hat ihre Enden bei f und f' und der induzierte Strom fließt von dort in diejenige Leitung, in welcher man ihn benutzen will. Die sekundäre Spule besteht hier aus sehr vielen Windungen, um die elektromotorische Kraft, die Spannung des sekundären Stromes zu erhöhen. Bei jeder Schließung und jeder Öffnung des primären Stromes durch den Hammer entsteht in der sekundären Spule ein Induktionsstoß; die Enden f und f' des sekundären Drahtes erhalten eine Spannungsdifferenz, bald in dem Sinne, daß f positive, f' negative Spannung, bald umgekehrt, daß f negative, f' positive Spannung hat. Je größer die Zahl der Windungen auf der sekundären Spule ist, um so größer ist die erzeugte Spannung der Induktionsströme und ebenso wird sie um so größer, je rascher, je plötzlicher der Strom im primären Leiter sich an Stärke ändert. Daß aus diesem Grunde die Öffnungsströme in der sekundären Spule viel stärker gespannt sind, als die Schließungsströme, wissen wir bereits. Daher kommt es, daß wenn man, etwa durch ein Elektrometer, die Spannungsdifferenz zwischen f und f' mißt, man immer findet, daß das eine Ende, z. B. f, dauernd eine größere Spannung hat als das andere, obwohl doch eigentlich die Spannung abwechselnd bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne wirken sollte. Da die Öffnungsströme eben viel stärker gespannt sind, als die Schließungsströme, so mißt man dabei nur die ersteren.

Fig. 212.



Eine wesentliche Erhöhung der Wirksamkeit der Induktionsapparate hat Fizeau durch eine Einrichtung hervorgebracht, durch welche er die Spannung der Induktionsströme erst bedeutend vergrößerte. Wirksam sind, wie gesagt, in der sekundären Spule die Öffnungsströme, die also in dem Moment entstehen, wo sich in Fig. 213 r von s abhebt. Bei dieser Unterbrechung des primären Stromes entsteht aber in der primären Rolle der Öffnungsextrastrom, der zwischen r und s große Spannung hervorruft, so daß zwischen r und s der Öffnungsfunke erscheint. Dieser Funke beeinträchtigt aber die Wirkung des Induktionsapparates. Denn er bildet eine Verlängerung der Dauer des primären Stromes. Der primäre Strom geht nicht momentan auf Null zurück, sondern allmählich, er dauert an, bis der Funke abgelaufen ist. Könnte man den Funken beseitigen oder verkleinern, so würde die Wirkung des Apparates erhöht werden. Das hat nun Fizeau getan, indem er die beiden Leiter r und s, zwischen denen die Unterbrechung stattfindet, mit den beiden Belegungen eines Kondensators verband. Dieser ist in der Fig. 213 oben als C gezeichnet. Er besteht gewöhnlich aus paraffiniertem Papier, dessen Seiten mit Stanniol belegt sind. Mehrere Schichten solcher Kondensatoren sind übereinander gelagert und die Belegungen der einen Seite, sowie die der anderen sind miteinander verbunden. Die Elektrizitätsmengen, die an der Unterbrechungsstelle r und s durch den Extrastrom entstehen, verbreiten sich über diesen Kondensator, der eine große Kapazität besitzt, und dadurch wird die Spannungsdifferenz an der Unterbrechungsstelle und mit ihr der Öffnungsfunke kleiner. Der Kondensator befindet sich gewöhnlich in dem Kasten, auf dem der Induktionsapparat montiert ist.

Fig. 213.

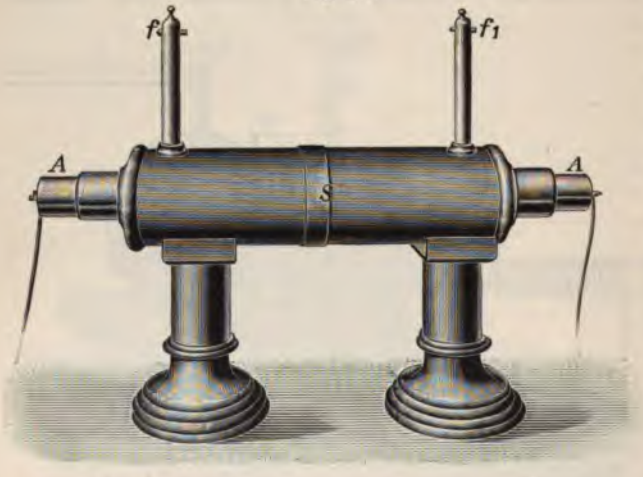


Solche Induktionsapparate, zum Teil von sehr erheblicher Größe, wurden zuerst in vollkommener Weise von Ruhmkorff in Paris konstruiert. Man nennt sie deswegen auch heute noch, selbst wenn sie von anderen verfertigt sind, zuweilen Ruhmkorffs. Da sie bisher hauptsächlich zur Erzeugung von elektrischen Funken benutzt wurden, werden sie auch häufig als Funkeninduktoren bezeichnet.

Während man früher die Hauptteile eines Funkeninduktors, primäre

und sekundäre Rolle, Unterbrecher, Kondensator, gewöhnlich zusammen montierte, ist man jetzt davon abgekommen. Man betrachtet die beiden Rollen mit dem Eisenkern als denjenigen Teil des Apparates, der für sich allein hauptsächlich die Transformation von Strömen bewirkt. Die Unterbrecher kann man in verschiedenfacher Weise konstruieren und jeden Funkeninduktor mit verschiedenen Unterbrechern arbeiten lassen. Auch den Kondensator trennt man jetzt zuweilen von dem eigentlichen Induktor und man gibt auch demselben Induktor mehrere Kondensatoren von verschiedener Kapazität bei, um jedesmal den wählen zu können, welcher die größte Wirkung bei dem gerade benutzten Unterbrecher gibt. Der Kondensator muß groß genug sein, um die Spannung an der Unterbrechungsstelle wirksam zu verringern, er darf aber nicht zu groß sein, weil er sonst bei den rasch aufeinander folgenden Ladungen den primären Strom merklich schwächen würde. Ein Induktionsapparat ohne Unterbrecher und ohne Kondensator, wie er jetzt oft gebaut wird, ist in Fig. 214 dargestellt. Man sieht nur die weit hervorragende primäre Wickelung A mit ihrem Eisenkern, und die sekundäre Rolle S mit den Klemmen f und f_1. An A werden die Zuleitungsdrähte des primären Stromes direkt befestigt. Die Anschlußklemmen müssen so weit abstehen, daß kein Funke von f oder f_1 auf sie überspringt.

Fig. 214.



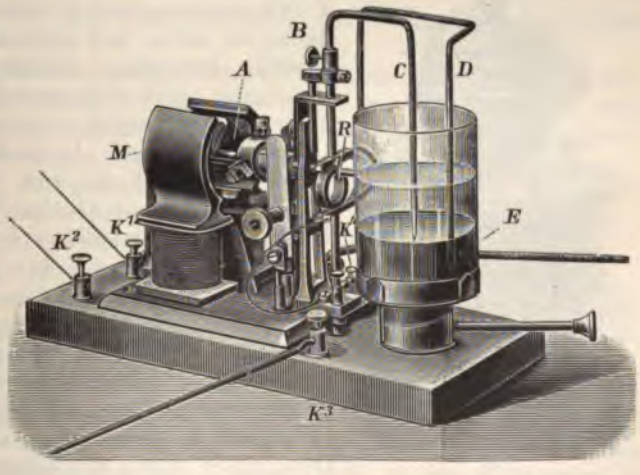
Auf die Konstruktion der Unterbrecher hat man in den letzten Jahren ganz besondere Sorgfalt verwendet und man hat sie in sehr verschiedener Art ausgeführt. Außer dem Federunterbrecher, der in Fig. 212 zu sehen und in Fig. 213 schematisch gezeichnet ist, wendet man vielfach einen auf demselben Prinzip beruhenden Hammer an, bei dem aber die Unterbrechung des Stromes nicht an einem Platinstück, sondern an einer Quecksilberfläche stattfindet, weil das Platin durch die Öffnungsfunken allmählich schlechter wirksam wird. Bei einem solchen Quecksilberunterbrecher, der in Fig. 215 besonders gezeichnet ist, schwebt ein eiserner Anker A über dem Magnetkern des Induktionsapparates an einem Hebel, der auf der anderen Seite eine Spitze S trägt, die in Quecksilber taucht oder aus ihm herausgezogen wird. Über das Quecksilber in dem Gefäß schichtet man gewöhnlich Alkohol oder Wasser, um die Oxydation durch die Luft auszuschließen. Zuweilen montiert man die

Unterbrecher derartig an die Induktionsapparate, daß man den Feder- und den Quecksilberunterbrecher auswechseln kann.

Die Feder- und die Quecksilberunterbrecher erlauben höchstens 20 Unterbrechungen des Stromes in der Sekunde zu erreichen. Um die Unterbrechungszahl zu vergrößern, hat man die beiden einfachen Apparate umgeformt. Bei den Quecksilberunterbrechern läßt man nämlich den Stift, der abwechselnd in das Quecksilber getaucht und wieder herausgezogen wird, von einem kleinen elektrischen Motor treiben. Man nennt diese Art der Unterbrecher deshalb Motorunterbrecher. In Fig. 216 ist ein derartiger gezeichnet, der von der E. G. Polyphos in München konstruiert ist. Ein kleiner mit Draht umwickelter Eisenkern bei A, in den der Strom eines Akkumulators durch K^1 und K^2 eingeleitet wird, dreht sich zwischen den Polen eines Magneten M. Seine Achse trägt exzentrisch einen Ring R, der bei seiner Drehung den Stift C auf und ab bewegt, wodurch dieser entweder in das Quecksilber E eintaucht oder herausgezogen wird. Von den Klemmen K^3 und K^4 geht die Verbindung nach denjenigen beiden Punkten des Induktionsapparates, zwischen denen die Unterbrechung stattfinden soll. Der eine dieser Punkte ist durch K^4 und den Stift D mit dem Quecksilber, der andere mit dem beweglichen Stift C verbunden. Mit einem Motorunterbrecher kann man mehr als 30 Unterbrechungen pro Sekunde erzielen und kann die Unterbrechungszahl auch bequem regulieren.

Fig. 215.

Fig. 216.



Der gewöhnliche Hammerunterbrecher ist durch eine besondere, von Deprez herrührende Konstruktion zu einem rascheren Unterbrecher umgeformt worden. Der nach ihm genannte Deprez-Unterbrecher kann bis 45 Unterbrechungen pro Sekunde ausführen. Man

sieht diesen Unterbrecher besonders gezeichnet in Fig. 217. Er besteht aus einem kleinen Stück aus weichem Eisen M M, welches um die Achse E drehbar ist. Das eine Ende (bei b) steht dem Eisenkern des Induktionsapparates gegenüber, wird angezogen, wenn dieses magnetisch ist, und unterbricht dadurch den Strom, der durch die verstellbare Spitze S und b geführt wird. Um das Eisenstück, wenn der Strom unterbrochen ist, wieder gegen die Spitze S zu legen, dient eine kleine Feder bei a, welche stärker oder schwächer gespannt werden kann. Die Kleinheit dieser Feder bewirkt, daß die Schwingungen des Unterbrechers, der ja ganz symmetrisch gebaut ist, sehr rasche sind.

Fig. 217.

So gute Resultate auch die Deprez- und Motorunterbrecher liefern, so rasch und regelmäßig auch die Unterbrechungen mit diesen stattfinden, so sind sie doch wesentlich nur brauchbar für verhältnismäßig schwache Ströme, solchen von wenigen Ampere, da bei starken Strömen die Öffnungsfunken so kräftig werden, daß sie die Unterbrecher ruinieren. Die Quecksilberunterbrecher sind in dieser Beziehung den Platinunterbrechern überlegen.

Um nun auch starke Ströme zu unterbrechen und zwar sehr viel rascher, als man es bisher konnte, hat zuerst die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) eine besondere Konstruktion des Quecksilberunterbrechers ausgeführt, die das Problem tatsächlich sehr vollkommen löst. Sie bezeichnet diesen Apparat, der in Fig. 218 in äußerer Ansicht dargestellt ist, als Turbinenunterbrecher. Der neue Gedanke ist dabei, daß erstens keine hin und her gehende Bewegung, sondern eine rotierende stattfindet, und daß zweitens nicht die festen Teile es sind, welche rotieren, sondern das Quecksilber selbst. In dem unteren Gefäß in der Fig. 218 befindet sich am Boden Quecksilber, bedeckt mit Alkohol. Fig. 219 zeigt das Innere dieses Gefäßes. In das Quecksilber taucht ein Metallrohr ein, von dem aus eine seitliche Ausflußöffnung (an der runden Scheibe in der Figur sichtbar) einem Quecksilberstrahl den Austritt gewährt. Die runde Scheibe wird noch von dem Alkohol bedeckt. Das Rohr wird durch einen Elektromotor (oben in der Fig. 218) in rasche Rotation versetzt und saugt das Quecksilber durch die Zentrifugalkraft auf, so daß es aus der horizontalen Ausflußöffnung in einem kräftigen Strahl ausspritzt. Der Strahl trifft nun auf einen Metallring, der mit Aussparungen versehen ist, so daß er abwechselnd das Metall trifft oder durch die Öffnung hindurchspritzt. Nun ist das Quecksilber mit dem

Fig. 218.

einen Pol der Batterie verbunden, der Metallring mit der primären Spule des Induktionsapparates, und man sieht, daß man bei der Rotation des Quecksilbers abwechselnd Schließungen und Öffnungen des Stromes bekommt, die je nach der Geschwindigkeit der Drehung und der Zahl der Segmente des Metallringes zwischen 10 und 1000 in der Sekunde variieren können. Solche Geschwindigkeiten lassen sich mit den früheren Unterbrechern nicht erzielen. Für gewöhnlich benutzt man den Unterbrecher mit einem Metallring, wie Fig. 220, bei welchem man 100 Unterbrechungen in der Sekunde erzielt. Der Elektromotor sowohl wie der Turbinenunterbrecher, also auch die mit diesem verbundene primäre Spule, werden mit einer Spannung von zirka 110 Volt betrieben, wie sie in vielen Städten jetzt eingeführt ist. Durch die hohe Spannung erhält die primäre Spule sehr hohe Stromstärken und infolgedessen treten sehr große Energiemengen auch in der sekundären Spule auf.

Fig. 219.

Dasselbe, was dieser sorgfältig konstruierte Apparat leistet, dasselbe leistet ein Unterbrecher ganz anderer Art, der von Wehnelt erfunden wurde und der von ihm „elektrolytischer Unterbrecher" genannt wurde, und der für viele Zwecke das Einfachste darstellt, was in diesem Gebiet bisher existiert.

Wenn man in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure, wie U in Fig. 221, zwei Elektroden eintaucht, von denen die eine eine große Platte P b, etwa aus Blei, ist, während die andere aus einer Platinspitze p besteht, die durch ein Glasrohr hindurch in die Flüssigkeit geführt wird, und wenn man diese Elektroden mit den Polen einer großen Batterie S (etwa von 100 Volt Spannung) so verbindet, daß die Spitze Anode wird, und wenn man ferner noch in diesen Kreis eine Drahtrolle W, etwa die primäre Rolle eines Induktionsapparates einschaltet, so sieht man erstens an der Spitze eine helle Leuchterscheinung und hört zweitens einen lauten Ton. Der Ton beweist, daß hier periodische Vorgänge vorhanden sind. Die helle Leuchterscheinung kommt von dem Glühen der Gase, welche sich an den Elektroden in großer Menge entwickeln. An der Spitze p entwickelt sich Sauerstoff. In der Tat finden in dieser Zelle sehr rasche Unterbrechungen und Schließungen des Stromes statt, so daß sie einen ganz selbsttätigen Unterbrecher darstellt. Die Ursache dieser Unterbrechungen ist nicht

Fig. 220.

sofort einzusehen, sie ist auch keine einfache. Durch den Strom, der infolge der Selbstinduktion der Rolle W allmählich ansteigt, wird zuerst an p Sauerstoff entwickelt, ferner aber wird, weil der Querschnitt der Strombahn an der Spitze am geringsten ist, dort die größte Joulesche Wärme entwickelt, so daß sich die an der Spitze anliegenden Flüssigkeitsteilchen in Dampf verwandeln. Der Sauerstoff und dieser Dampf werden durch die Hitze selbst glühend, der Strom geht durch die Gashülle hindurch von der Spitze in die Flüssigkeit. Bald aber zerlegt sich, durch die große Hitze, der Wasserdampf in Sauerstoff und Wasserstoff; diese Gase nehmen ein größeres Volumen ein, so daß die Gasschicht zwischen Spitze und Flüssigkeit so groß wird, daß der Strom nicht mehr hindurchgehen kann. Der Strom ist unterbrochen, wobei durch die Selbstinduktion ein starker Öffnungsfunke entsteht. Die Gasblasen steigen nun sofort in die Höhe, dadurch kommt die Flüssigkeit wieder in Berührung mit der Spitze und der Strom fängt wieder an zu fließen und so geht der Prozeß weiter. Das langsame Ansteigen des Stromes durch die Selbstinduktion der Rolle ist bei diesem Vorgang wichtig. Je nach der Selbstinduktion, der Größe der Spannung der Batterie und der Größe der Spitze erhält man auf diese Weise Unterbrechungen, deren Zahl zwischen 200 und 2000 in der Sekunde variiert, also enorm groß ist. Eine Form dieses Unterbrechers von Siemens & Halske ist in Fig. 222 gezeichnet. Auf der linken Seite der Flüssigkeitszelle sieht man als negative Elektrode eine Bleiplatte, in der Mitte ist an dem Deckel ein Porzellanrohr befestigt, durch welches die in eine Platinspitze auslaufende positive Elektrode hindurchgeht. Durch die Schraube oben kann sie weiter oder weniger weit aus dem Rohr hinaus geschraubt werden.

Fig. 221.

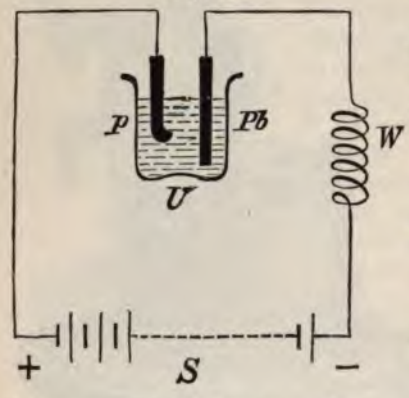


Fig. 222.

Der Wehneltunterbrecher hat nur den einen Übelstand, daß durch die starken Ströme sich die Flüssigkeit sehr rasch erhitzt, so daß man den Strom nur immer ganz kurze Zeit hindurchsenden darf. Um diesen Übelstand zu verringern, nimmt man große Gefäße mit großen Flüssigkeitsmengen. Häufig bringt man in dasselbe Gefäß auch 2 oder 3 Porzellanrohre mit Spitzen, damit man von der Regulierung einer Spitze unabhängiger wird.

Das Charakteristische am Wehneltunterbrecher besteht darin, daß der Strom, der im übrigen die ganze Flüssigkeitsmasse zu seiner Ausbreitung zur Verfügung hat, an der Spitze gezwungen ist, sich auf einen sehr kleinen

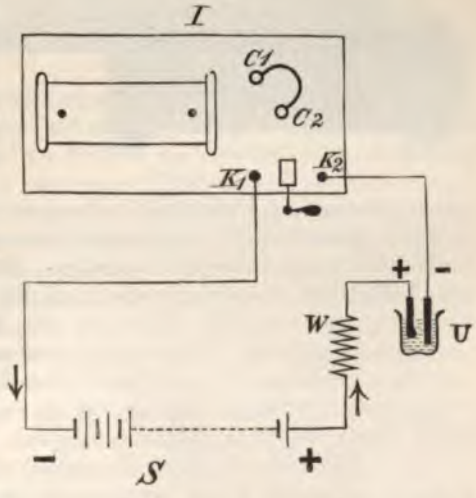
Querschnitt zusammenzuziehen. Infolgedessen tritt an der Spitze die große Joulesche Wärmemenge auf, welche nun die Flüssigkeit verdampft und dadurch den Strom unterbricht, wie es oben beschrieben wurde.

Wenn aber diese plötzliche Verengerung der Strombahn in einem Elektrolyten die Hauptursache für den Effekt ist, so läßt sich, wie Simon zeigte, der Unterbrecher noch in anderer Form, ohne Platinspitze konstruieren. Man bringt, wie Fig. 223 zeigt, in das Gefäß mit Schwefelsäure und Bleiplatte ein Porzellanrohr hinein, welches an seinem Boden ein oder mehrere sehr feine Löcher von etwa 1 qmm Querschnitt hat. In dem Rohr befindet sich ebenfalls die Schwefelsäure und von oben taucht in dasselbe eine Elektrode, z. B. eine Bleielektrode. Dann muß der Strom, um von der einen Elektrode zu der anderen zu gelangen, durch die Flüssigkeit in den engen Löchern gehen und an diesen Stellen entwickelt sich auch wieder, weil der Querschnitt sehr klein, also der Widerstand sehr groß ist, eine große Wärmemenge, welche nun dieselben periodischen Wirkungen hervorbringt wie an der Platinspitze des Wehneltunterbrechers. Der Simonunterbrecher hat fast dieselben Vorzüge wie der Wehneltsche und ist dabei einfacher und billiger herzustellen.

Fig. 223.

Will man einen dieser Unterbrecher zum Betrieb eines Funkeninduktors, an dem ein gewöhnlicher Unterbrecher (Platin- oder Quecksilberunterbrecher) angebracht ist, benutzen, so muß man diesen kurzschalten, d. h. die beiden gewöhnlich getrennten Stücke desselben direkt oder durch einen dicken Draht verbinden. In Fig. 224 ist eine solche Schaltung gezeichnet. Von der Batterie S (am besten etwa 100 Volt, es genügen aber schon 30 Volt) geht der Strom durch den Unterbrecher U zum Kommutator K_1 K_2 des Induktionsapparates. Der gewöhnliche Unterbrecher C_1 C_2 mit dem Kondensator ist kurzgeschaltet.

Fig. 224.



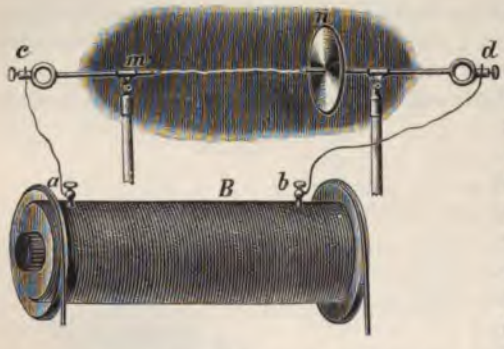
Die Spannung, die in der sekundären Spule solcher Induktionsapparate erzeugt wird, ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je mehr Windungen die sekundäre Spule hat. Durch Anwendung von sehr vielen Windungen kann man also mit den Induktionsapparaten sehr hohe Spannungen erzeugen.

Wie wir aber in dem ersten Kapitel gesehen haben, muß Elektrizität von hoher Spannung sehr sorgfältig isoliert werden, damit sie nicht entweicht. Es ist deshalb bei den Apparaten dieser Art immer notwendig, die Drähte sorgfältig zu isolieren. Dies geschieht dadurch, daß man sie ganz in Paraffin einbettet, welches vorher sorgfältig erhitzt und von Luft befreit wird, und jede Drahtlage von der anderen durch gut paraffiniertes Papier oder durch Glimmer sorgfältig trennt.

Alle diejenigen Erscheinungen, zu denen eine große Spannung der Elektrizität gehört, lassen sich durch Induktionsapparate in vorzüglicher Weise ausführen. Wir haben insbesondere schon mehrfach gesehen, daß Elektrizität von hoher Spannung im stande ist, den Widerstand leicht zu überwinden, welchen eine Luftschicht, die sich zwischen den Enden der Leitungsdrähte befindet, dem Strom entgegenstellt. Es bildet sich der elektrische Funke. Hier bei unseren Induktionsapparaten haben wir Elektrizität von außerordentlich hoher Spannung und wir können daher durch solche Induktionselektrizität auch die Erscheinungen des elektrischen Funkens erhalten, wie mit der Elektrisiermaschine.

Eine Einrichtung zu diesen Versuchen ist in Fig. 225 abgebildet. Man sieht darin die Induktionsrolle B, welche innen die induzierende Spule und einen Eisenkern enthält. Die Enden der Induktionsspule a und b sind durch Drähte mit den Enden d und c zweier verschiebbarer Metallstäbe verbunden, von denen der eine in einer Spitze m, der andere in einer Scheibe n endet. Sobald der Apparat im Gang ist, kommt induzierte Elektrizität von außerordentlich hoher Spannung an die Spitze m und die Scheibe n und durchbricht die Luftschicht dazwischen in einem glänzenden, klatschenden Funken. Je stärker die Spannung ist, um so weiter können Spitze und Scheibe auseinander gebracht werden, ohne den Funkenübergang aufhören zu lassen. Es ist daher umgekehrt die Größe des Abstandes, in dem gerade noch Funken übergehen, die sogenannte Schlagweite, ein Maß und ein Kennzeichen für die Größe der erzeugten Spannung. Deswegen klassifiziert man die Induktionsapparate nach dieser Schlagweite und spricht von Apparaten mit 5, 10, 15 cm u. s. w. Schlagweite. Schlagweiten bis 30 cm lassen sich durch verhältnismäßig kleine und einfache Apparate erzeugen. Bei größeren Schlagweiten (man ist bis zu 1 m Länge bisher gekommen) macht die Herstellung genügender Isolation gegen die hohen Spannungen große Schwierigkeiten, doch werden so große Apparate jetzt von einigen Fabriken mit Sicherheit hergestellt. Als ungefährer Anhalt über den Zusammenhang zwischen der Zahl der sekundären Windungen eines Induktionsapparates und der erzeugten Schlagweite kann folgende Tabelle dienen, die sich auf ausgeführte Apparate

Fig. 225.



bezieht und natürlich noch abhängig ist von der angewendeten primären Rolle, dem Unterbrecher und dem Kondensator. Es wurden erzeugt

Funken von der Länge . .	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100 cm
durch eine sekundäre Windungszahl von	9	18	26	35	42	50	59	68	76	86 Tausend.

Wenn man Induktionsapparate mit den neueren Unterbrechern, dem Turbinen- oder dem Wehneltunterbrecher betreibt, so werden die Funkenerscheinungen viel glänzendere. Da man nämlich dann gewöhnlich einen Strom von 100—120 Volt Spannung in die primäre Spule hineinsendet, während man bei den Feder- und Quecksilberunterbrechern höchstens 16—20 Volt anwendet, so ist die Energiemenge, die in den primären Kreis hineingegeben wird, eine viel größere als sonst und daher ist auch die Energiemenge, die man im sekundären Kreis erhält, eine sehr große. Das heißt aber, bei gleicher Spannung in der sekundären Rolle

Fig. 226.

ist die Stromstärke, die man erhält, eine viel größere. Man kann jetzt bei Induktionsapparaten von der sekundären Spule Stromstärken bis zu 0,1 Ampere bekommen, was bei 50 000 bis 100 000 Volt Spannung schon eine erhebliche Leistung ist und einem Effekt von 5 bis 10 Kilowatt (6,8—13,6 Pferdekräfte S. 115) entspricht. Infolgedessen bekommt man zwischen Spitze und Platte nicht bloß einen glänzenden Funken, sondern man bekommt ein glänzendes Funkenbüschel, einen ganzen Lichtstrom, der auch mit einem sehr betäubenden Getöse verbunden ist. In Fig. 226 ist eine Abbildung dieser Erscheinung gegeben, wie sie schon ein Induktionsapparat von 40 cm Schlagweite ergibt, wenn er mit einem dieser neuen Unterbrecher betrieben wird.

Es ist übrigens nicht notwendig, den primären Strom immer durch einen Unterbrecher öffnen und schließen zu lassen, um Induktionsströme zu erhalten. Das ist nur e i n e von den Möglichkeiten, wie man Induktionsströme in der sekundären Spule erzeugen kann. Eine andere, vielfach benutzte Methode besteht darin, daß man W e c h s e l s t r ö m e durch die primäre Spule hindurchsendet, die man etwa in einer magnetelektrischen Maschine (S. 219) erzeugt hat. Läßt man solche Wechselströme durch die primäre Spule hindurchgehen, so ändert sich ja in dieser

fortwährend die Richtung und Stärke des Stromes und daher müssen auch in einer die primäre umgebenden Spule fortwährend Induktionsströme entstehen, da jede Veränderung in dem primären Strom einen Induktionsstrom erzeugt. Um dabei hohe sekundäre Spannungen zu erhalten, muß man natürlich Wechselströme mit sehr vielen Wechseln pro Sekunde anwenden.

Die elektromotorische Kraft, die Spannung der Induktionsströme ist, wie wir sahen, um so größer, je größer die Zahl der sekundären Windungen und je größer die primäre Stromstärke ist. Dies benutzt man in den Induktionsapparaten, um aus einem primären Strom von geringer Spannung (einigen Volt), aber verhältnismäßig großer Stärke, umgekehrt durch Induktion Ströme von sehr hoher Spannung aber geringer Intensität zu erzeugen. Man kann aber auch umgekehrt durch Induktion die Stromstärke im sekundären Strom größer und die Spannung im sekundären Strom geringer machen als im primären. Wenn man nämlich die sekundäre Spule aus wenigen, dicken Windungen macht und dagegen die primäre Spule aus sehr vielen Windungen bestehen läßt und durch sie Wechselströme von hoher elektromotorischer Kraft, aber dabei geringer Intensität hindurchsendet, so ist klar, daß in der sekundären Rolle die Verhältnisse gerade die entgegengesetzten werden. Es wird nämlich die induzierte elektromotorische Kraft verhältnismäßig klein, weil sehr wenig sekundäre Windungen vorhanden sind und weil die primäre Stromstärke gering ist. Dagegen kann der sekundäre Strom stark werden, weil der innere Widerstand sehr gering ist, indem er eben nur aus einigen Windungen dicken Drahtes besteht.

So hat man es also durch Induktionsapparate in der Hand, vermittels primärer Ströme von großer Intensität und geringer Spannung sekundäre Ströme zu erzeugen von großer Spannung und geringer Intensität und umgekehrt. Die in jeder Sekunde entwickelte Energie in einem elektrischen Strom ist ja (s. S. 114) das Produkt aus seiner Spannung und seiner Intensität. Man sieht also, daß man durch Induktion die elektrische Energie eines Stromes in andere Form bringen, verwandeln kann, ohne natürlich ihre Menge vergrößern zu können. Praktische Verwendung hat diese Umwandlung außer in den Induktionsapparaten erfahren in den Transformatoren, von welchen im zweiten Teil, Kapitel 4, die Rede sein wird.

10. Kapitel.

Die Wechselströme und Drehströme.

Die galvanischen Säulen und die Thermosäulen liefern, wenn sie durch den äußeren Stromkreis geschlossen werden, galvanische Ströme, welche dauernd dieselbe Richtung haben. Stets fließt im Stromkreis, z. B. eines Daniellschen Elements, der positive Strom vom Kupferpol durch den äußeren Stromkreis zum Zinkpol. Solche Ströme nennt man deshalb gleichgerichtete Ströme, oder kurz Gleichströme, und sie waren es lange Zeit allein, welche beachtet und genau studiert wurden. Ihr Grundgesetz ist das Ohmsche Gesetz.

Dagegen haben wir bei der Behandlung der Induktionserscheinungen zum erstenmal das Auftreten von Strömen anderer Art in einem Stromkreis kennen gelernt, von Strömen, deren Richtung rasch hintereinander wechselt und welche man deshalb Wechselströme nennt. Die Eigenschaften dieser Wechselströme wurden Jahrzehnte hindurch wenig näher untersucht. Man hielt sie lange Zeit für ein unerwünschtes Produkt der Induktion und suchte nach Mitteln, um aus ihnen durch passende Kommutierung Gleichströme entstehen zu lassen. Die eigentümlichen Erscheinungen und Gesetze dieser Ströme wurden erst spät Gegenstand der allgemeineren Untersuchung. Dabei aber hat sich gezeigt, daß die Wechselströme uns viel mannigfaltigere Erscheinungen bieten als die Gleichströme, so daß sie vom wissenschaftlichen Standpunkt interessanter und vom praktischen Standpunkt mindestens ebenso wichtig sind, wie die Gleichströme, und wir wollen daher ihre Eigenschaften im Zusammenhang besprechen.

Wechselströme werden durch abwechselnde Induktionswirkungen leicht erzeugt, sei es durch Schließen und Öffnen eines primären Stromes, oder durch Annähern und Entfernen desselben an einen sekundären Kreis, oder bei der Magnetinduktion durch Erzeugung und Vernichtung eines Magneten, oder durch Nähern oder Entfernen desselben. Diese verschiedenen Erzeugungsweisen bringen in einer Induktionsrolle immer abwechselnd einen Strom in der einen Richtung, dann einen Strom in der entgegengesetzten Richtung hervor, die also in der Induktionsrolle selbst und in deren äußerem Schließungskreis fließen.

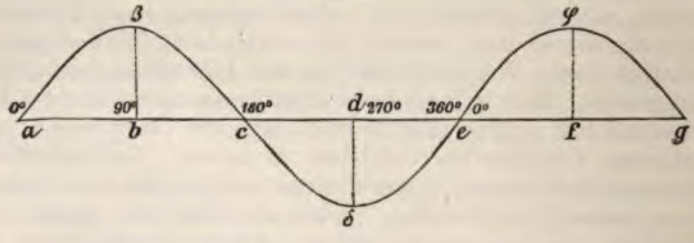
Um in die Verhältnisse einen näheren Einblick zu gewinnen, nehmen wir an, daß wir unsere kleine Maschine haben, die in Fig. 206 auf S. 219 gezeichnet ist, in welcher durch gleichmäßige Drehung der Drahtrollen R und R′ vor den Polen des Magneten Induktionsströme von abwechselnder Richtung erzeugt werden.

Wir denken uns die beiden Enden der Drahtrollen zunächst offen, nicht durch den äußeren Stromkreis geschlossen. Drehen wir die Rollen, so werden die beiden Enden eine Spannungsdifferenz bekommen, die mit

dem Beginn der Drehung anfangen wird zu wachsen, die bis zu einem Maximalwert zunehmen und dann wieder abnehmen wird. Wenn die Rollen vor den Polen des Magneten gerade vorbeigehen, wird kein Strom induziert. Dann ist die Spannungsdifferenz Null. Drehen sich die Rollen weiter, so wird die Spannungsdifferenz zunächst wachsen, positive Werte bekommen, diese werden bis zu einem Maximum ansteigen, dann wieder abnehmen, bis die Rollen sich um 180° gedreht haben. Dann ist die Spannungsdifferenz der Enden wieder Null und bei weiterer Drehung wird sie nun negative Werte bekommen, das vorher positive Ende des Drahtes wird nun negativ sein und diese negative Spannungsdifferenz wird nun auch wieder bis zu einem Maximalwerte wachsen, dann abnehmen, durch Null hindurchgehen und dann wird die Spannungsdifferenz wieder positiv werden.

Wir können diesen Verlauf der Spannungsdifferenz der offenen Rollen d. h. der elektromotorischen Kraft leicht durch eine Zeichnung darstellen. In Fig. 227 sind die Werte der elektromotorischen Kraft durch Linien dargestellt, die senkrecht auf die Linie a g gezeichnet sind. Im Punkt a ist

Fig. 227.

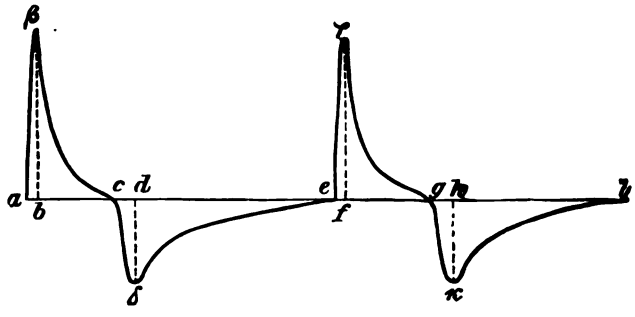


die elektromotorische Kraft gleich Null. Der Punkt a entspricht also der Stellung der Rollen, bei denen sie gerade über den Magnetpolen sich befinden. Die elektromotorische Kraft wächst dann nach der einen Richtung bis zum Punkt b, wo sie am größten ist (b β), wo also die Rollen in einer Richtung sich um 90° gedreht haben. Sie nimmt dann ab bis zum Punkt c, wo sie Null wird. Dort haben sich die Rollen um 180° von der Anfangslage aus bewegt. Dann kehrt die elektromotorische Kraft ihre Richtung um, was durch die nach unten gezogenen Linien angedeutet ist. Sie wächst in dieser Richtung bis d, und nimmt dann wieder ab bis e. Am letzteren Punkte sind die Rollen nach einer Drehung von 360° gerade wieder in ihre ursprüngliche Lage gekommen, sie haben eine vollständige Umdrehung gemacht und nun wiederholt sich derselbe Vorgang von neuem. Man nennt die Zeit, in welcher eine solche vollständige Umdrehung gemacht wird, die Periode der Drehung. Und wir sehen, die elektromotorische Kraft des Wechselstromes hat dieselbe Periode, wie die Drehung des Rollenpaares. Nach einer vollständigen Umdrehung (z. B. in $^1/_{100}$ Sekunde) durchläuft die elektromotorische Kraft wieder genau dieselben Werte. Man bezeichnet ferner die Winkel, um welche die Rollen sich von der Anfangslage a aus, wo die Spannung Null ist, gedreht haben, als die Phasen der Bewegung. Bei der Phase 0 ist also die Spannung 0, bei der Phase 90° am größten u. s. w.

Wir wollen nun die Enden unserer Rollen durch einen äußeren Leiter verbinden, von dem wir zunächst annehmen wollen, daß er kein erhebliches Selbstpotential (S. 226) besitzt, also etwa eine bifilar gewundene Rolle oder ein einfacher Draht ist. Durch diesen Leiter fließen nun Wechselströme hindurch, d. h. Ströme, deren Intensität und Richtung sich ebenfalls periodisch ändert, und zwar wird die Stromstärke ebenfalls durch eine solche Wellenkurve angegeben sein, wie in Fig. 227. Die Stromstärke wird also in a gleich Null sein, sie wird bis zu einem Maximum wachsen, dann wieder abnehmen bis Null; dann wird der Strom seine Richtung ändern, die Stromstärke in dieser Richtung wird wieder bis zu einem Maximum wachsen, dann abnehmen bis Null u. s. w.

Man erhält also auch periodische Veränderungen der Stromstärke in dem Schließungskreis. Dabei ist es aber gar nicht nötig, daß die elektromotorische Kraft und die Stromstärke so regelmäßig ab- und zunehmen, wie es in unserer Figur gezeichnet ist und wie es bei der beschriebenen Anordnung tatsächlich der Fall ist. Nehmen wir z. B. an, wir erzeugen in einer Rolle Wechselströme dadurch, daß wir einen in der Nähe befindlichen primären Strom durch einen Neefschen Hammer abwechselnd öffnen und schließen. Wir sahen (S. 227), daß der Öffnungsinduktionsstrom viel plötzlicher ansteigt und viel höhere elektromotorische Kraft hat, als der Schließungsstrom. Wenn daher der Neefsche Hammer arbeitet, so wird der Verlauf der elektromotorischen Kraft und daher auch des Stromes in unserem sekundären Kreis etwa so sein, wie es Fig. 228 angibt. Im Moment des Öffnens bei a steigt die elektromotorische Kraft rasch an bis β und fällt sofort wieder bis Null; beim Schließen steigt die elektromotorische Kraft im umgekehrten Sinne langsamer und weniger hoch bis δ und fällt wieder bis Null u. s. w. Auch hier bekommt man periodische Ströme insofern, als nach jeder Öffnung und Schließung der Verlauf sich wiederholt, aber man bekommt keine einfach periodischen Wechselströme. Ja der Verlauf der induzierten Ströme in einer solchen Rolle ist sogar noch komplizierter. Wenn nämlich der Neefsche Hammer arbeitet, so macht er etwa 10 bis 30 Stromschließungen und Stromöffnungen in der Sekunde. Die Periode dieser Wechsel ist also $^1/_{10}$ bis $^1/_{30}$ Sekunde. Innerhalb dieser Periode entsteht zuerst ein Öffnungsstrom, der stark ansteigt und rasch abfällt und der vielleicht im ganzen $^1/_{10\,000}$ Sekunde dauert. Dann ist eine ganze Zeit der Stromkreis stromlos, bis nach etwa $^1/_{15}$ Sekunde der Strom durch den Hammer geschlossen wird und nun der Schließungsstrom in der sekundären Spule weniger steil verläuft. Auch dieser dauert aber nur sehr kurze Zeit, etwa $^1/_{10\,000}$ Sekunde, und dann ist die Spule

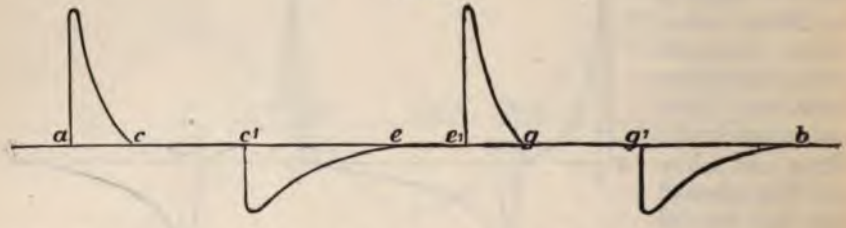
Fig. 228.



wieder stromlos, bis zur nächsten Öffnung. Der Verlauf der elektromotorischen Kraft wird also in Wirklichkeit durch eine Zeichnung wie in Fig. 229 dargestellt. Der Periode entspricht die Strecke a bis e_1. In dieser Periode sind aber nur zwei kurz verlaufende Ströme vorhanden, zwischendrin ist gar kein Strom und keine Spannung vorhanden. Für die folgenden Betrachtungen machen diese Verschiedenheiten wenig aus und wir wollen daher den einfacheren Fall der einfach periodischen Wechselströme betrachten, welche durch Fig. 227 dargestellt sind.

Zunächst entsteht die Frage: was versteht man unter der Stromstärke eines Wechselstromes und wie kann man dieselbe messen? Die Stromstärke wächst ja periodisch von Null an bis zu einem Maximum und nimmt dann wieder ab, sie hat also bei einem Wechselstrom in jedem Moment einen anderen Wert. Man ist nun übereingekommen, unter der Stromstärke eines Wechselstromes eine mittlere Stromstärke während der Dauer einer Periode zu verstehen, also nicht das Maximum der eigentlichen Stromstärke (die Linien b β resp. d δ in Fig. 227),

Fig. 229.



noch den kleinsten Wert derselben — nämlich Null —, sondern einen bestimmten mittleren Wert aus allen Einzelwerten der Stromstärke. Man bezeichnet diese auch als effektive Stromstärke. Da der Effekt eines Stromes immer von dem Quadrat der Stromstärke abhängt, so nimmt man den sogenannten quadratischen Mittelwert, d. h. die Wurzel aus der Summe der Quadrate der einzelnen Stromstärken. Wenn man von Stromstärke eines Wechselstromes spricht, so versteht man darunter immer die effektive.

Wie kann man nun die Stromstärke eines Wechselstromes messen, in Ampere ausdrücken? Jedenfalls nicht durch ein Voltameter, denn ein solches reagiert nur auf Gleichströme; ebensowenig durch ein Galvanometer, denn die Magnetnadel würde durch die beiden aufeinanderfolgenden entgegengesetzten Ströme auch entgegengesetzt abgelenkt werden, also in Ruhe bleiben. Man kann also nur entweder die Wärmewirkungen (die Joulesche Wärme) oder die elektrodynamischen Wirkungen der Ströme zum Messen von Wechselströmen benutzen; denn die ersten sind ganz unabhängig von der Richtung des Stromes und die zweiten lassen sich auch so anwenden, daß die Stromrichtung ohne Belang ist.

Beide Methoden sind angewendet worden, wir wollen aber hier nur die zweite besprechen, die Messung von Wechselströmen durch Elektrodynamometer. Bei den Elektrodynamometern (S. 203) ist immer

eine feste und eine bewegliche, vom Strom durchflossene Rolle vorhanden, von denen die letztere von der ersten abgelenkt wird mit einer Kraft, die von dem Produkt der Stromstärken in beiden Rollen abhängt. Sind also beide Rollen von demselben Strom durchflossen, so hängt die Ablenkung von dem Quadrat der Stromstärke ab und ändert ihre Richtung nicht, wenn der Strom sich in beiden Rollen zugleich umkehrt, also auch nicht, wenn die Rollen von Wechselströmen durchflossen werden. Die Ablenkung ist dabei direkt ein Maß für das Quadrat der effektiven Stromstärke der Wechselströme. Ist daher das Elektrodynamometer geeicht, ist sein Reduktionsfaktor bestimmt, so kann man aus seinen Angaben die Stromstärke eines Wechselstroms direkt in Ampere finden.

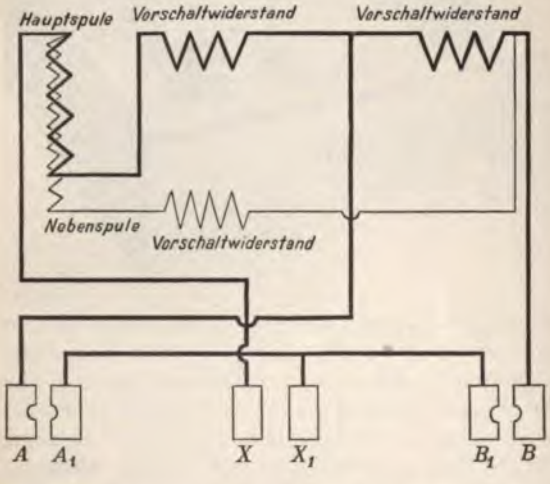
Ein solches Elektrodynamometer für schwache Ströme, welches zu rein wissenschaftlichen Messungen gebraucht wird, mit Spiegelablesung, haben wir oben (S. 203) beschrieben. Für die Messung stärkerer Wechselströme hat sich mit der allmählich immer weiter um sich greifenden Anwendung derselben das Bedürfnis nach einfachen Apparaten geltend gemacht, und insbesondere nach Meßapparaten, bei welchen man, ohne weitere Manipulationen, die Stromstärke nach Einschaltung des Instrumentes sofort an einer Skala ablesen kann, also nach Instrumenten, welche ebenso bequem zu benutzen sind, wie die Präzisionsamperemeter für Gleichstrom. Aus diesem Grunde haben zuerst Siemens & Halske, die seit ihrer Gründung durch Werner Siemens ebenso die Bedürfnisse der Technik wie die der Wissenschaft und Meßkunde pflegen, einen Apparat in Verkehr gebracht, den sie Präzisionsamperemeter für Gleichstrom und Wechselstrom nennen. Nach ihrem Vorgang werden ähnliche Wechselstromapparate jetzt auch von anderen Firmen konstruiert. Die Instrumente sind Elektrodynamometer, d. h. sie besitzen eine feste und eine bewegliche Drahtrolle. Eine äußere Ansicht dieses Apparates gibt Fig. 230. Im Innern desselben befindet sich eine feste Drahtrolle und eine bewegliche. Der beweglichen wird der Strom durch dünne Federn zugeführt. Damit nun der Zeiger, der mit der beweglichen Spule verbunden ist und der über der am Apparat oben sichtbaren Skala sich bewegt, ohne Schwingungen sich sofort auf die richtige Stelle begibt, ist die bewegliche Spule mit einer künstlichen Luftdämpfung ver-

Fig. 230.

sehen. Zu dem Zweck ist (Fig. 231) eine gebogene Röhre angebracht, in welcher sich die Dämpferscheibe p bewegen kann. Diese ist nämlich durch den festen Arm b an der Achse der beweglichen Rolle befestigt, und wenn diese sich dreht, so bewegt sich die Scheibe in der Röhre, wobei wegen des engen Zwischenraums die Luftreibung eine starke Dämpfung ausübt. Eigentlich sollten die feste Spule und die bewegliche von demselben Strom durchflossen werden, die beiden Spulen also hintereinander geschaltet werden. Da aber die dünnen Aufhängedrähte der beweglichen Spule von den starken zu messenden Strömen nicht durchflossen werden dürfen, so sind bei diesen Instrumenten die feste und die bewegliche Spule parallel geschaltet, wie die Skizze in Fig. 232 zeigt. Wenn bei allen Stromstärken und Perioden der Widerstand der festen und der beweglichen Spule derselbe bleiben würde, so würde die Ablenkung der beweglichen Spule direkt die Stromstärke messen. Aber die Widerstände beider Spulen ändern sich erstens durch Joulesche Wärme und zweitens mit der Periodenzahl, wie wir gleich sehen werden. Um den Einfluß dieser Änderungen möglichst gering zu machen, so daß er für praktische Zwecke verschwindet, ist erstens zu der festen Rolle noch ein Vorschaltwiderstand im Boden des Apparates angebracht, der aus Manganin gefertigt ist und bifilar gewickelt ist, also keinen Temperatureinfluß und kein Selbstpotential besitzt, und ist zweitens auch vor die bewegliche Rolle ein ebensolcher Widerstand vorgeschaltet. Dadurch sind die Einflüsse der Temperatur und Periodenzahl praktisch beseitigt. Die feste Rolle erhält übrigens zwei verschiedene solcher Vorschaltwiderstände, von denen man durch den Stöpsel, bei $A A_1$ den linken, durch den Stöpsel bei $B B_1$ den linken und rechten zusammen einschalten kann. Dadurch bekommt das Amperemeter zwei Meßbereiche. Bei $X X_1$ wird der zu messende Strom eingeführt. Je nach der Ausführung der Instrumente gibt es solche für schwache Ströme, die von 6 bis 30 Milliampere messen, und andererseits solche für starke Ströme von 40 bis 200 Ampere.

Fig. 231.

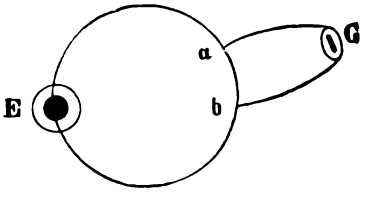
Fig. 232.



Außer diesen Elektrodynamometern mit Rollen kann man aber auch noch eine zweite Art von Elektrodynamometern konstruieren, nämlich solche mit weichem Eisen. Wenn man nämlich statt der beweglichen Rolle eine Nadel aus unmagnetischem weichen Eisen innerhalb der festen Rolle aufhängt, so hat man offenbar ebenfalls ein Elektrodynamometer, welches auf Wechselströme reagiert. Denn der Strom, der in der festen Rolle zirkuliert, erregt in der Nadel aus weichem Eisen Magnetismus und macht sie also zu einer temporären Magnetnadel, die durch den Strom abgelenkt wird. Wechselt nun der Strom in der festen Rolle seine Richtung, so wechselt auch die Lage der Pole in der Nadel und die Nadel bleibt daher wieder nach derselben Richtung abgelenkt. Ein solches Elektrodynamometer mit weichem Eisen gibt also Ausschläge der Nadel, welche direkt ein Maß für die Stromstärke, nicht für das Quadrat derselben sind und in bekannter Weise durch Bestimmung des Reduktionsfaktors auf Ampere umgerechnet werden können. Damit ein solches, prinzipiell sehr vorteilhaftes Instrument aber wirklich exakt wirke, ist notwendig, daß das weiche Eisen der Nadel den Magnetismus a tempo annimmt und wechselt, gleichzeitig mit der Stromstärke, ohne etwas von dem früheren Magnetismus zurückzubehalten. Dies ist nur schwer und kaum auf die Dauer sicher zu erreichen, und daher sind die Elektrodynamometer nach diesem Prinzip für wissenschaftliche Zwecke kaum, dagegen für technische Zwecke häufig im Gebrauch, wenn es bei diesen nicht auf die höchste Genauigkeit ankommt. Bei den technischen Meßinstrumenten für Wechselstrom im zweiten Abschnitt werden wir derartige Apparate zu besprechen haben.

Wenn man so mit den Elektrodynamometern die Stärke von Wechselströmen messen kann, so kann man dieselben Apparate aber auch zur Messung von Spannungsdifferenzen benutzen. Sie messen bei Wechselströmen dann die mittlere Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten eines Stromkreises, die man auch die effektive Spannung nennt. Zu dem Zwecke hat man bloß (Fig. 233) ein solches Elektrodynamometer G als Zweigleitung an die beiden Punkte des Stromkreises a und b anzulegen, deren Spannungsdifferenz man messen will. Die Angabe des Elektrodynamometers, die an der Teilung desselben abgelesen wird, ist direkt der gesuchten effektiven Spannungsdifferenz zwischen a und b proportional, aus genau demselben Grunde, wie ein Galvanometer in der Zweigleitung die Spannungsdifferenz mißt (S. 193 f.).

Fig. 233.



Zur bequemen Ausführung dieser Messungen werden von Siemens & Halske Präzisionsvoltmeter für Gleichstrom und Wechselstrom hergestellt, welche den eben beschriebenen Präzisionsamperemetern ganz analog gebaut sind. Jedes dieser Instrumente hat auch eine feste Rolle mit einem oder zwei Vorschaltwiderständen, die ohne Temperaturabhängigkeit und ohne Selbstpotential sind und von diesen zweigt die bewegliche Rolle ab. Man hat so in jedem Instrument zwei Meßbereiche,

z. B. von 3 bis 15 und von 6 bis 30 Volt messend. Will man größere Spannungen messen, also das Instrument weniger empfindlich machen, so schaltet man den Instrumenten noch einen abgemessenen induktionsfreien Widerstand vor. Fig. 234 gibt die Ansicht eines solchen, der in einem durchlöcherten Blechkasten eingeschlossen ist. Schaltet man einen solchen Widerstand vor, so ist die Empfindlichkeit auf die Hälfte, ein Drittel u. s. w. herabgesetzt, so daß die Ablesung nicht direkt die Volt angibt, sondern 2-, 3-, 4mal so viel Volt, als man abliest.

So haben wir also nun die Mittel, um die effektiven Stromstärken und Spannungen eines Wechselstromes zu messen.

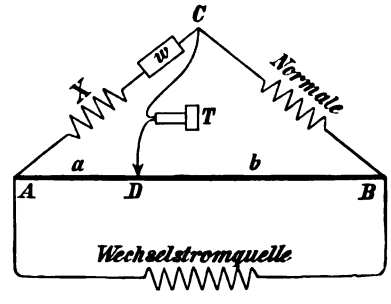
Bisher hatten wir angenommen, daß der Wechselstrom durch eine Leitung gesendet wird, die kein erhebliches Selbstpotential hat, also etwa durch eine bifilar gewickelte Rolle oder durch einen ausgespannten Draht.

Fig. 234.

Wenn man aber Wechselströme durch einen Leiter sendet, dessen Selbstpotential (S. 224) erheblich ist, etwa durch eine gewöhnlich gewundene Drahtrolle oder noch besser durch eine Drosselspule (S. 226), so entstehen ja in diesem Leiter Extraströme, weil die Richtung und die Stärke des Stromes sich fortwährend ändert. Und diese Extraströme wirken immer der vorhandenen elektromotorischen Kraft entgegen. Daraus folgt aber, daß die Stromstärke, die in einer solchen Rolle von der vorhandenen elektromotorischen Kraft hervorgebracht wird, kleiner sein wird, als sie dem Ohmschen Gesetz entspricht. Denn tatsächlich wirkt nicht die äußere elektromotorische Kraft allein, sondern diese abzüglich der entstehenden elektromotorischen Kraft des Extrastromes. Bei derselben äußeren elektromotorischen Kraft ist also die Stromstärke in einer solchen Rolle kleiner, als sie bei einem Gleichstrom sein würde, d. h. es macht den Eindruck, als ob der Widerstand der Rolle gegen Wechselströme größer ist, als gegen konstante Ströme. Eine solche Rolle zeigt daher eine scheinbare Vergrößerung des Widerstandes gegen Wechselströme. Man bezeichnet jetzt häufig den scheinbaren Widerstand einer Rolle, den sie gegen Wechselströme zeigt, als ihre Impedanz, zum Unterschied von dem gewöhnlichen (Ohmschen) Widerstand, den die Rolle gegen Gleichströme hat. Die Impedanz ist immer größer als der Widerstand, und zwar um so mehr, je rascher die Wechselströme aufeinander folgen, je kleiner also die Periode der Wechselströme ist, und um so mehr, je größer das Selbstpotential des Leiters ist. Bei einem geraden Draht ist der Unterschied zwischen Impedanz und Ohmschem Widerstand gewöhnlich zu vernachlässigen, bei einer unifilar gewundenen Rolle dagegen ist er sehr erheblich. Bei einer bifilar gewickelten Rolle (S. 226), die kein Selbstpotential besitzt, ist der

Unterschied gleich Null. Eine solche bifilar gewickelte Rolle hat also bei Wechselströmen denselben Widerstand wie bei Gleichströmen. Aus diesem Grunde muß man z. B. die Widerstandsrollen, welche man in den Widerstandskästen braucht, stets bifilar wickeln, wenn man sie auch für Wechselströme benutzen will. Man unterscheidet deshalb bei Wechselströmen immer die Leitungen, durch die der Strom fließt, als induktionsfreie, wenn sie kein erhebliches Selbstpotential besitzen, und als induktive, wenn sie ein solches von erheblicher Größe besitzen. Ganz induktionsfrei ist natürlich streng genommen gar keine Leitung. Man sieht sofort, daß eine stark induktive Leitung, wie etwa eine Drosselspule, die in den Kreis einer Wechselstromspannung eingeschaltet ist, den Strom viel mehr schwächt, als es ihrem gewöhnlichen Widerstand entspricht. Es kommt eben nicht ihr Widerstand, sondern ihre Impedanz in Betracht. Eine solche Rolle mit Eisenkern kann einen 1000mal größeren Widerstand für Wechselstrom als für Gleichstrom haben, sie läßt also von einem Wechselstrom fast nichts hindurch, während ein Gleichstrom sie ungehindert passiert. Deswegen gerade bezeichnet man solche Spulen mit großem Selbstpotential als Drosselspulen, weil sie den Strom (aber nur einen Wechselstrom) gewissermaßen abdrosseln.

Fig 235.

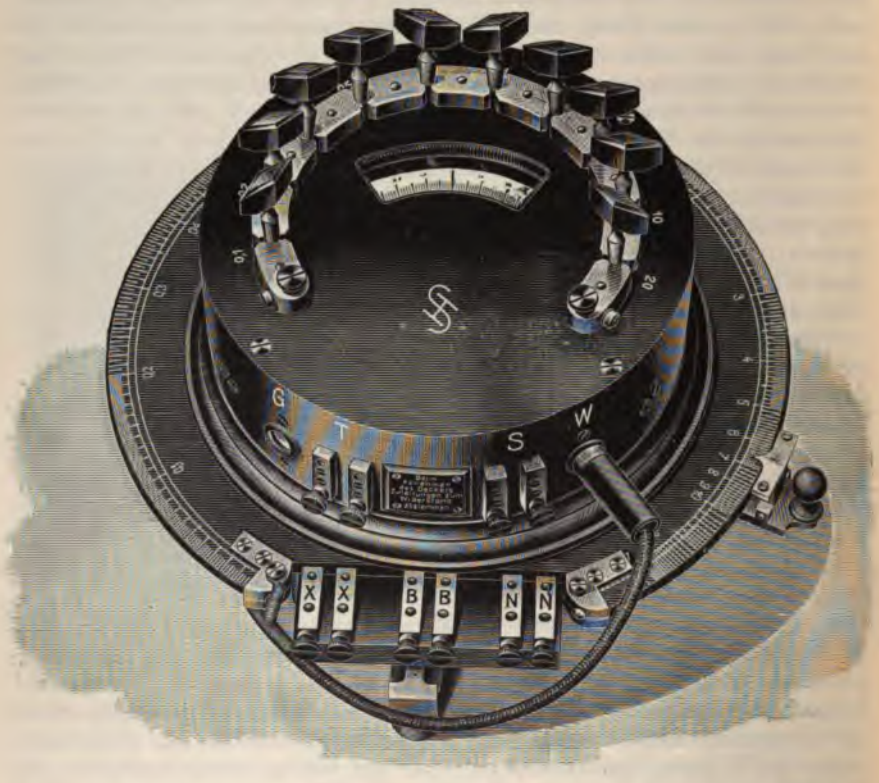


Das Selbstpotential von Drähten spielt also bei Wechselströmen eine ebenso wichtige Rolle, wie der gewöhnliche Ohmsche Widerstand bei Gleichströmen. Es wurden daher in der letzten Zeit auch Methoden und Apparate ausgebildet, um Selbstpotentiale ebenso leicht und bequem bestimmen zu können, in Henry ausdrücken zu können, wie man Widerstände in Ohm ausdrückt. So wie man für die letzteren Normalohm oder geeichte Widerstände hat und mit diesen den zu messenden Widerstand vergleicht, so hat man zur Messung des Selbstpotentials jetzt Normale der Selbstinduktion, welche auf S. 225 schon besprochen und abgebildet sind. Zur Vergleichung eines unbekannten Selbstpotentials mit einem Normale dient am einfachsten wieder die Wheatstonesche Brücke, aber mit Wechselstrom betrieben. In Fig. 235 ist die Schaltung dargestellt. Ein Wechselstromerzeuger dient als Stromquelle, links bei X ist das zu messende Selbstpotential und ein gewöhnlicher Widerstandskasten w, rechts ist das Normale (z. B. 1 Henry) angebracht. In die Brücke ist ein Telephon T eingeschaltet. Man verschiebt nun den Kontakt D auf einem ausgespannten Draht so lange, bis der Ton im Telephon möglichst schwach wird. Dann schaltet man aus w Widerstände aus und verschiebt D wieder und zwar so lange, bis man ein ganz scharfes Minimum des Tons erhält. Dann verhält sich das gesuchte Selbstpotential von X zu dem bekannten des Normales wie die Längen der Drahtstücke a und b. Zugleich verhält sich dann auch der Wechselstromwiderstand (Impedanz) im Zweige A C zu dem Widerstand im Zweige C B ebenfalls wie diese Längen. Wenn man vorher oder nachher mit Gleich-

strom den gewöhnlichen Widerstand von A C mißt, so kann man zugleich die Vergrößerung des Widerstandes der gemessenen Rolle bei Wechselstrom gegenüber Gleichstrom festlegen.

Der von Siemens & Halske konstruierte Apparat, der zu diesen Messungen dient, ist in Fig. 236 gezeichnet. Er ist ähnlich wie das Universalgalvanoskop gebildet. Der ausgespannte Draht ist kreisförmig in die Nuht der geteilten Schieferplatte eingelegt. Ein Kontakt kann an diesem Kreisdraht entlang geführt werden. Auf der Schieferplatte

Fig. 236.



sitzt ein Präzisionsamperemeter, dessen Skala man sieht. Der Widerstandskasten w ist, wie die Stöpsel zeigen, im Kreise um das Amperemeter angeordnet. Zur Messung der Selbstinduktion und der Impedanz einer Rolle wird diese an die unten sichtbaren Klemmen X X angeschlossen. Die Wechselstromquelle, die gleich beschrieben werden soll, wird an die Klemmen S angelegt. An N wird das Normale der Selbstinduktion und an T das Telephon angeschlossen und ein am Apparat angebrachter Stöpsel wird in das Loch W gesteckt. Dann besteht also die Messung darin, daß man abwechselnd den Schleifkontakt verstellt und Widerstände aus dem Kasten zieht, bis man ein scharfes Tonminimum im Telephon hat. Das Verhältnis der Längen des Schleifdrahtes, das man direkt auf der Schieferplatte ab-

liest, gibt dann sofort das Verhältnis des gesuchten Selbstpotentials zu dem bekannten des Normales. Um auch die scheinbare Widerstandsvermehrung zu ermitteln, muß man noch den gewöhnlichen Gleichstromwiderstand kennen. Zu dem Zweck wird der Stöpsel in das Loch G gesteckt, wodurch das Amperemeter eingeschaltet ist und ein galvanisches Element an die Klemmen B gelegt, und nun wird gerade so verfahren, wie beim Universalgalvanometer.

Als Quelle für den Wechselstrom kann man für dieses Instrument nicht einen gewöhnlichen kleinen Induktionsapparat mit Neefschem Hammer nehmen, weil der Stromverlauf in dessen sekundärer Spule, wie wir wissen (S. 241), kein einfach periodischer ist und weil das Telephon im obigen Apparat nur bei einfach periodischen Wechselströmen ein scharfes Tonminimum ergibt. Man kann aber den Neefschen Hammer ersetzen durch ein kleines Instrument, welches Fig. 237 zeigt und welches als Summerumformer bezeichnet wird. Bei diesem werden durch eine hin und her schwingende Telephonmembran einfach periodische Schwankungen in einen primären Strom und daher einfach periodische Wechselströme in einer von dieser induzierten Sekundärspule erzeugt. Indem man verschieden starke Telephonmembranen einsetzt, kann man damit Wechselströme von zirka 400, 500 und 650 Perioden in der Sekunde erzeugen.

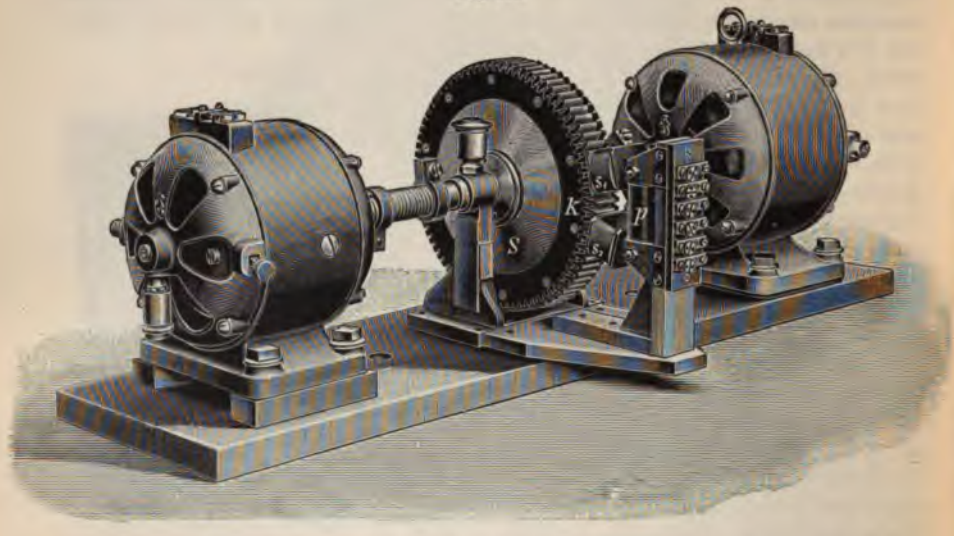
Fig. 237.

Das Selbstpotential sowohl, wie die Widerstandsvergrößerung hängen aber wesentlich ab von der Periode des Wechselstromes. Bei raschen Wechseln sind sie größer als bei langsamen. Man muß deshalb die Rollen möglichst bei denjenigen Perioden prüfen, für welche man sie auch benutzen will. Um nun noch sehr viel raschere Wechsel, bis zu 7000 in der Sekunde, in einer Wechselstromquelle zu erzeugen, und zwar einfach-periodische, haben Siemens & Halske eine Maschine konstruiert, welche als Hochfrequenzmaschine bezeichnet wird. In Fig. 238 stellt der mittlere Teil gerade diese Maschine dar, die Apparate rechts und links sind nur zwei Elektromotoren, welche zum Drehen dieser Maschine benutzt werden. Der Hochfrequenzapparat selbst besteht aus einem Zahnrad S, mit 100 Zähnen, welches aus mehreren hundert dünnen Blechscheiben zusammengesetzt ist, die voneinander isoliert und durch den Kranz k aus Hartgummi zusammengehalten sind. Dieses Rad dreht sich vor den Polen eines Hufeisenmagneten, der durch die Rolle p magnetisiert wird. Die Pole selbst aber tragen zwei Wickelungen s_1 und s_2, und in diesen wird der Hochfrequenzstrom erzeugt. Durch die rasche Annäherung und Entfernung der Zähne nämlich unterliegt der Magnetismus der Pole fortwährenden Schwankungen und diese induzieren in s_1 und s_2 einen einfach periodischen Wechselstrom. Bei einer Umdrehung der Scheibe erhält man so 100 Perioden, und wenn die Elektromotoren

der Scheibe eine Geschwindigkeit von 70 Umdrehungen pro Sekunde erteilen, was sich erreichen läßt, so sieht man, daß man einen Wechselstrom von 7000 Perioden in der Sekunde erhält. Durch langsamere Drehung der Elektromotoren kann man natürlich auch geringere Periodenzahl erhalten. Damit die Schwankungen in dem Magnetismus des Elektromagnets, die auch auf die Spule p induzierend wirken, nicht in dieser auch Wechselströme erzeugen, ist in die Stromzuleitung zu dieser eine Drosselspule (S. 247) eingeschaltet, welche diese Wechselströme bis zur Unmerklichkeit schwächt.

Mittels dieser sehr sorgfältig durchgearbeiteten Apparate ist es jetzt also möglich, in sehr kurzer Zeit Selbstinduktionen von Rollen zu

Fig. 238.



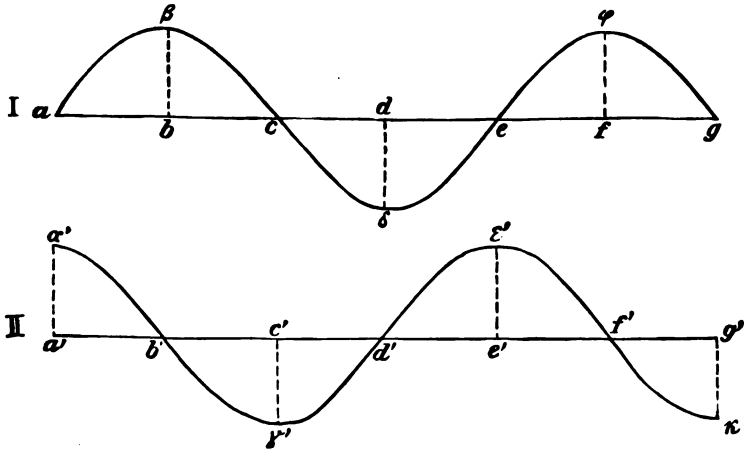
bestimmen, eine Aufgabe, die früher in den Laboratorien immer als eine Haupt- und Staatsaktion galt.

Wir kehren nun zu der Betrachtung der Eigenschaften der Wechselströme zurück. Haben wir schon bisher eine Reihe von wesentlichen Unterschieden im Verhalten eines Wechselstromes und Gleichstromes gefunden, so werden diese Unterschiede noch größer, wenn wir nun zwei Ströme gleichzeitig betrachten, also z. B. einen Wechselstrom sich verzweigen lassen. Zwei verschiedene Gleichströme unterscheiden sich nur durch ihre Stromstärke und ihre Richtung. Wenn daher zwei solche Gleichströme zu gleicher Zeit durch einen und denselben Draht fließen, so ist die Stromstärke in dem Draht die Summe oder die Differenz der beiden einzelnen Stromstärken. Ganz anders ist es bei Wechselströmen. Zwei verschiedene Wechselströme können sich durch drei verschiedene Dinge unterscheiden. Erstens kann die (effektive) Stromstärke in beiden verschieden sein, wie bei Gleichströmen. Zweitens kann die Periode bei beiden verschieden sein, der eine kann z. B. eine Periode von $^1/_{100}$ Sekunde, der andere eine von $^1/_{250}$ Sekunde haben. Aber selbst

wenn die Perioden beider Wechselströme gleich sind, können sie sich noch dadurch unterscheiden, daß sie nicht gleichzeitig ihre maximalen Werte erreichen, also auch nicht gleichzeitig durch Null hindurchgehen und ihre Richtung ändern. Dieser Unterschied besteht aber darin, daß die beiden Wechselströme verschiedene Phasen haben.

Wenn wir z. B. in unserer Maschine auf S. 219 außer den Rollen R R' noch zwei andere miteinander verbundene Rollen auf derselben Achse anbringen, so jedoch, daß diese beiden um je 90° von R und R' abstehen, so wird, wenn die Achse mit den Rollen rotiert, immer das eine Rollenpaar im Maximum der Induktion sein, wenn auf das andere gerade keine Induktion ausgeübt wird und umgekehrt. Die Ströme der beiden Rollenpaare haben dann dieselbe Periode, aber einen Phasenunterschied von 90° gegeneinander. Durch eine Zeichnung kann man sich solche zwei Wechselströme von gleicher Periode, aber mit einem Phasenunterschied leicht

Fig. 239.



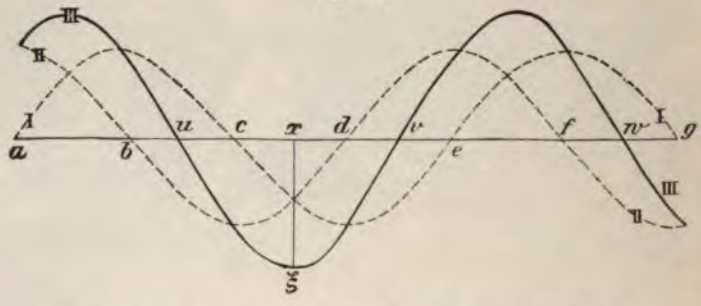
versinnlichen. In Fig. 239 sind zwei Wechselströme gezeichnet, deren Phasen um 90° verschieden sind. In den Punkten a und a', also in demselben Moment, herrscht in I die Stromstärke 0, in II aber die maximale Stromstärke a' α'. In den Punkten b und b' ist umgekehrt in I die maximale Stromstärke β b, in II die Stromstärke 0 vorhanden. In den Punkten c und c' ist in I wieder die Stromstärke 0, in II die maximale Stromstärke c' γ' nach der entgegengesetzten Seite vorhanden u. s. w.

Denken wir uns nun von den beiden Rollenpaaren die Ströme gleichzeitig durch denselben äußeren Draht geschickt, so addieren sich in jedem Moment die vorhandenen Stromstärken. In Fig. 240 sind die beiden früheren Kurven I und II punktiert gezeichnet und die Kurve III, die stark ausgezogen ist, gibt in jedem Moment die Summe der Stromstärken, sie stellt die Resultante der beiden Wechselströme dar. Man sieht daraus zunächst, daß die maximale Stromstärke in der Resultante zwar größer ist, als die maximale Stromstärke in jedem der beiden Wechselströme, aber kleiner als die Summe der beiden ist. Man sieht zweitens, daß die Periode der Resultante dieselbe ist wie die der beiden Wechsel-

ströme (zwischen u und w ist dieselbe Strecke wie zwischen a und e oder wie zwischen b und f). Aber die Phase der Resultante ist eine andere, als die der beiden Wechselströme. Denn während die Kurve II im Punkt b durch Null nach unten hindurchgeht, die Kurve I im Punkt c, geht die Resultante III im Punkte u — zwischen beiden — durch Null hindurch. Ihr Phasenunterschied gegen I ist also nicht Null — dann würde sie bei c durch Null gehen, auch nicht 90^0 — dann würde sie bei b durch Null hindurchgehen — sondern liegt zwischen 0^0 und 90^0. In unserem Fall ist er gleich 45^0. Allgemein sehen wir daraus: wenn zwei Wechselströme von gleicher Periode, aber von verschiedener Phase durch einen Draht gesendet werden, so hat der resultierende Wechselstrom eine andere Phase als jeder der ihn zusammensetzenden Wechselströme, es tritt, wie man es nennt, eine Phasenverschiebung ein.

Die Phase resp. der Phasenunterschied tritt also als neues, und zwar unangenehm komplizierendes Element ein, wenn man

Fig. 240.



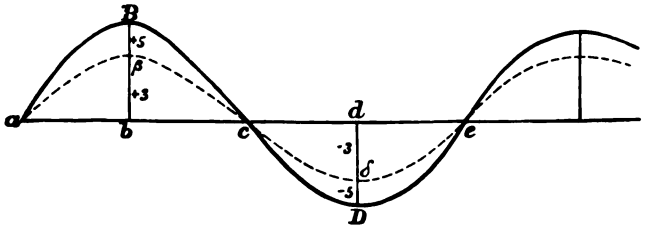
es mit Wechselströmen zu tun hat. Der Phasenunterschied hat nun verschiedene Folgen, durch welche die Wechselströme sich ganz anders verhalten wie Gleichströme.

Wenn man eine periodische elektromotorische Kraft auf einen Leiter wirken läßt, welcher erhebliches Selbstpotential besitzt, also etwa auf eine Drahtrolle oder eine Drosselspule, so muß der Strom in diesem Leiter eine andere Phase haben als die elektromotorische Kraft, die Stromumkehrungen können in ihm nicht in demselben Moment stattfinden, in welchem die Umkehrungen der elektromotorischen Kraft stattfinden. Denn außer der gegebenen elektromotorischen Kraft wirkt dann ja auf den Leiter noch die elektromotorische Kraft des Extrastromes, die Selbstinduktion, und zwar ist diese am größten, wenn die Stromstärke durch Null hindurchgeht und ihre Richtung wechselt, sie hat also eine andere Phase als die äußere elektromotorische Kraft, und daher muß der Strom selbst, der von dem Zusammenwirken der beiden elektromotorischen Kräfte herrührt, auch eine Phasenverschiebung gegen die äußere elektromotorische Kraft, die ihn erzeugt, besitzen.

Daraus folgt nun eine höchst wichtige und zunächst sehr sonderbare Tatsache in Bezug auf den Effekt, die Anzahl der Watt,

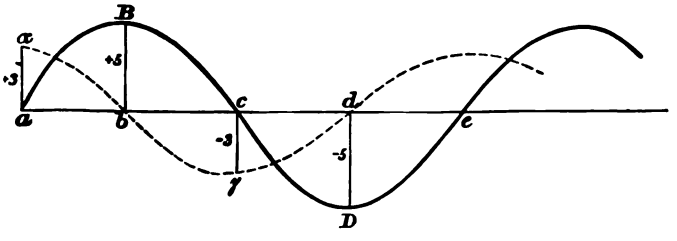
welche ein Wechselstrom besitzt. Bei Gleichströmen wissen wir (S. 114), daß der Effekt immer gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft (in Volt) und der Stromstärke (in Ampere) ist. Dieses Produkt gibt ohne weiteres die Zahl der Watt, welche der Strom mit sich führt. Bei einem Wechselstrom aber hat dieses Produkt zunächst in jedem Moment eine andere Größe, weil sowohl Spannung wie Stromstärke sich periodisch ändern. Wir müssen also hier wieder sagen, der wirkliche Effekt eines Stromkreises ist der Mittelwert aus allen Effekten, die er während einer

Fig. 241.



halben Periode hat. Wenn nun keine Phasendifferenz zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft stattfindet, d. h. wenn der Stromkreis induktionsfrei ist, so ist der Mittelwert der Watt gleich dem Produkt aus dem gemessenen Werte der (effektiven) Stromstärke und dem gemessenen Werte der (effektiven) Spannung. Dann hat man also noch immer denselben Fall wie bei Gleichströmen. Ist aber eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung vorhanden, so ist die Anzahl der Watt stets kleiner als dieses Produkt. Untersuchen wir, um dies einzusehen, die beiden extremen Fälle, in denen einmal die Phasendifferenz 0^0 (also keine Phasendifferenz), das andere Mal die Phasendifferenz 90^0 zwischen Strom und Spannung vorhanden ist. In Fig. 241 und 242 soll

Fig. 242.



die dick ausgezogene Linie die Stromstärke, die punktiert gezogene die Spannung bedeuten, und zwar wollen wir ihnen bestimmte Zahlenwerte zuschreiben. In Fig. 241 haben Strom und Spannung die gleiche Phase, beide fangen bei a mit 0 an, erreichen gleichzeitig ihre größten positiven Werte bei b ($b\beta = +3$ für die Spannung und $b\,B = +5$ für den Strom), nehmen wieder ab, gehen gleichzeitig bei c durch Null hindurch, bekommen negative Werte, und zwar gleichzeitig ihr negatives Maximum bei d (nämlich $d\,\delta = -3$ für die Spannung und $d\,D = -5$ für die Stromstärke) und nach Ablauf einer Periode kommen beide gleichzeitig nach e mit dem

Wert Null. Die Zahl der Watt, welche der Strom mit sich führt, ist der Mittelwert aus dem Produkt der Volt und der Ampere. Einige Einzelwerte dieses Produktes sind folgende:

Bei a ist das Produkt gleich Null, bei b ist das Produkt gleich 15 ($+3 \times +5 = 15$), bei c ist es 0, bei d wieder gleich 15 ($-3 \times -5 = 15$), bei $e = 0$. Die Zahl der Watt auf dem Wege a c ist also ebenso groß, wie die auf dem Wege c e. Der Effekt hat also einen zwischen 0 und 15 Watt liegenden Wert, sagen wir den Wert $7\frac{1}{2}$ Watt.

Ganz anders ist es bei Fig. 242, wo Stromstärke und Spannung eine Phasendifferenz von 90^0 haben. Hier ist bei a die Stromstärke Null und die Spannung gleich a α, gleich 3, also das Produkt gleich Null, bei b ist die Stromstärke gleich 5, aber die Spannung gleich Null, also das Produkt wieder Null; bei c ist das Produkt ebenfalls Null, weil die Stromstärke, und bei d ist es Null, weil die Spannung gleich Null ist. In den zwischenliegenden Punkten haben wir zwar immer Watt, welche nicht gleich Null sind, aber wir haben abwechselnd positive und negative Werte von gleicher Größe. Zwischen a und b sind die Stromstärke und Spannung beide positiv, ihr Produkt also auch positiv, zwischen b und c ist aber die Stromstärke positiv, die Spannung negativ, ihr Produkt also negativ und zwar ebenso groß, aber negativ, wie zwischen a und b. Daraus folgt, daß der ganze Effekt eines solchen Stromes gleich Null ist.

Ein Wechselstrom, dessen Stromstärke eine Phasendifferenz von 90^0 gegen die äußere Spannung hat, die ihn erzeugt, hat den Effekt Null, d. h. er führt keine Energie mit sich, er führt keine Watt.

Man bezeichnet einen solchen Strom deshalb als wattlosen Strom (oder auch als Leerstrom, idle current).

Vollkommen wattlose Ströme kann man allerdings nicht herstellen, aber man kann sich diesem Zustand, bei dem Strom und Spannung einen Phasenunterschied von 90^0 haben, sehr nähern.

Haben wir nun einen Wechselstrom, dessen Phasendifferenz gegen die Spannung nicht die extremen Werte 0^0 und 90^0, sondern dazwischen liegende Werte hat, so ist der Effekt dieses Stromes abhängig von dieser Phasendifferenz. Die Zahl der Watt, die ein solcher Strom mit sich führt, ist gleich dem Produkt aus der Spannung (in Volt), und der Stromstärke (in Ampere), aber noch multipliziert mit einer Zahl, die zwischen 1 und 0 liegt, also einem echten Bruch, der von der Phasendifferenz abhängt. Wir wollen ihn den Phasenfaktor nennen. (Er ist einfach gleich dem Kosinus der Phasendifferenz.) Der Phasenfaktor ist 1 für die Phasendifferenz 0^0, er ist 0 für die Phasendifferenz 90^0, und es ist allgemein

$$\text{Effekt eines Wechselstroms} = \text{Spannung} \times \text{Stromstärke} \times \text{Phasenfaktor}.$$

Es sieht also so aus, und es ist auch in der Tat so, als ob nicht die ganze beobachtbare Stromstärke bei einem Wechselstrom zur Berechnung des Effektes angewendet werden darf, sondern nur ein Bruchteil derselben, nämlich die beobachtete Stromstärke multipliziert mit dem Phasenfaktor (einem echten Bruch). Diesen Bruchteil der beobachtbaren Stromstärke bezeichnet man als die Stromstärke des Nutzstromes. Es ist also die

Stromstärke des Nutzstromes = wirkliche Stromstärke × Phasenfaktor

und es ist der

Effekt eines Wechselstromes = Spannung × Stromstärke des Nutzstromes.

Wirkt in dem Stromleiter, dessen Effekt man messen will, keine erhebliche Induktion, ist er also induktionsfrei, etwa ein gerade ausgespannter Draht oder eine Glühlampe oder eine Bogenlampe, so ist der Phasenfaktor nahezu gleich 1. Wirkt aber erhebliche Selbstinduktion in dem Stromstück, besteht er z. B. aus einer Drosselspule oder einem sonstigen Elektromagnete oder einem Elektromotor, ist also der Widerstand induktiv, so kann der Phasenfaktor nahezu gleich Null werden.

Aus diesen Überlegungen folgt sofort, daß man bei Wechselströmen nicht durch Messung der Spannung für sich und der Stromstärke für sich den Effekt ermitteln kann, sondern daß man im Gegenteil versuchen muß, den Effekt direkt zu messen. Das geht nun auch an, und die Apparate, die diese Messung ermöglichen, nennt man Wattmeter. Sie müssen also direkt das Produkt aus Stromstärke, Spannung und Phasenfaktor zu messen gestatten, wie diese in einem bestimmten Stromkreis vorhanden sind.

Auch für diese Messungen läßt sich das Elektrodynamometer verwenden und zwar in folgender Einrichtung. Die feste Rolle des Elektrodynamometers läßt man von dem Strom, dessen Effekt man messen will, direkt durchfließen. Die bewegliche Rolle aber schaltet man parallel zu dem Leiter, in dem der Effekt gemessen werden soll, man legt sie in den Nebenschluß zu ihm. Dann wissen wir aus früheren Betrachtungen, daß in der beweglichen Rolle ein Strom fließt, der proportional ist der zu messenden Spannung. Vorausgesetzt, was wir zunächst als erfüllt annehmen wollen, daß die bewegliche Rolle nicht selbst eine Phasenverschiebung hervorbringt, ist dann die Ablenkung der beweglichen Rolle gerade dem Effekt proportional, d. h. dem Produkt aus Stromstärke, Spannung und Phasenfaktor. Im allgemeinen aber ist die bewegliche Rolle selbst induktiv und wenn sie Ausschläge macht, also verschiedene Lagen gegen die feste Rolle einnimmt, so wirken die beiden Rollen noch in verschiedener Weise aufeinander und der induktive Widerstand der beweglichen Rolle ist also sogar variabel. Trotz dieser Schwierigkeiten ist es Siemens & Halske gelungen, ein Wattmeter nach diesem Prinzip zu konstruieren, welches durch einen Zeiger direkt die Anzahl der Watt abzulesen gestattet und welches sehr genaue Angaben macht, so daß es als Präzisionsapparat bezeichnet werden

Fig. 243.

kann. Äußerlich unterscheidet sich das Präzisionswattmeter, von dem Fig. 243 eine Ansicht gibt, nicht wesentlich von den vorher dargestellten Strom- und Spannungsmessern. Das Innere ist schematisch durch Fig. 244 dargestellt. Die dünndrähtige bewegliche Spule B bewegt sich innerhalb der festen, die eigentümlich geformt ist. Sie teilt sich nämlich oben und unten bei F in zwei Zweige, damit sie, in welcher Stellung auch die bewegliche Rolle sei, möglichst immer die gleiche Wirkung auf sie ausübe. Fig. 245 zeigt eine wirklich ausgeführte feste Rolle. Die bewegliche Rolle, die auch mit der oben S. 244 beschriebenen Luftdämpfung versehen ist, ist im Innern dieses festen Körpers um eine vertikale Achse beweglich aufgesetzt. Diese bewegliche Rolle, die aus 400 Windungen feinen Drahtes besteht, hat naturgemäß eine hohe Selbstinduktion, würde also eine wesentliche Phasenverschiebung hervorbringen. Man kann aber diese Phasenverschiebung auf einen sehr kleinen Wert bringen, wenn man noch einen sehr großen Widerstand ohne merkliches Selbstpotential vor sie schaltet, ebenfalls in den Nebenschluß. Faktisch bewirkt ein solcher großer induktionsfreier Widerstand, daß im Nebenschluß der Strom stark geschwächt wird, daß daher die Extraströme selbst ebenfalls geschwächt werden, und daß mithin die Phasendifferenz gegen die Spannung an den Enden eine zu vernachlässigende ist. Während die bewegliche Rolle bei diesen Instrumenten selbst 100 Ohm Widerstand besitzt, hat sie mit dem Vorschaltwiderstand zusammen 1000 Ohm. Auf diese Weise gibt der Ausschlag der beweglichen Rolle direkt den Effekt in dem untersuchten Drahtstück.

Fig. 244.

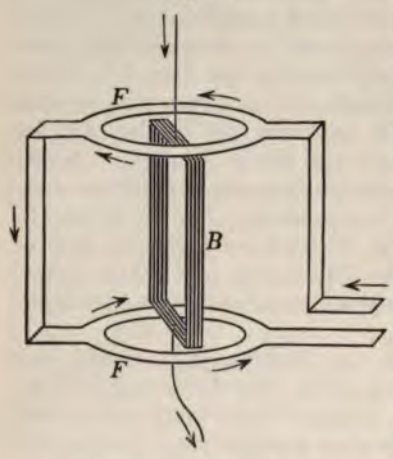


Fig. 245.

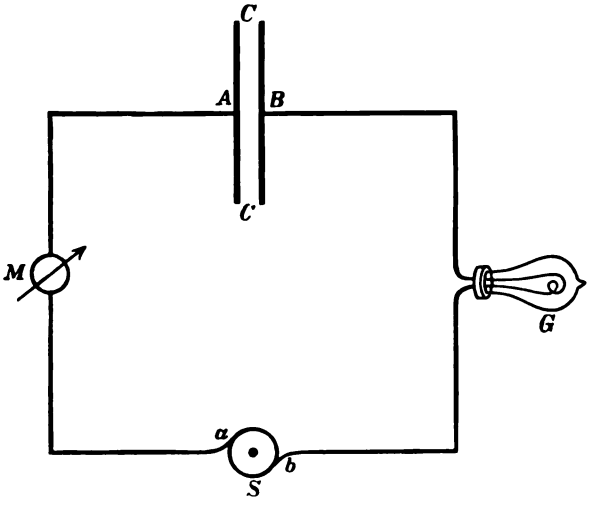
Wenn man nun bei Wechselströmen mit diesen drei Apparaten ausgerüstet ist, dem Amperemeter, Voltmeter und Wattmeter, so kann man offenbar für jedes Stromstück auch den Phasenfaktor experimentell messen. Man bestimmt einerseits den effektiven Strom und die effektive Spannung und andererseits die wirklichen Watt. Die letztere Größe dividiert durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung ist der Phasenfaktor des betreffenden Stromstücks:

$$\text{Phasenfaktor} = \frac{\text{Anzahl der Watt}}{\text{Anzahl der Ampere} \times \text{Anzahl der Volt}}.$$

Unsere bisherigen Betrachtungen über Wechselströme haben uns gezeigt, daß diese fast in allen Stücken anderes Verhalten zeigen wie die Gleichströme. Ein noch auffallenderer Unterschied aber liegt darin,

daß Gleichströme bekanntlich nur in ganz geschlossenen Kreisen fließen, während Wechselströme auch in ungeschlossenen Leitungen fließen und ihre Wirkungen hervorbringen. Wir wollen in dieser Hinsicht nur eine, aber die wichtigste Anordnung besprechen, die darin besteht, daß man einen Kondensator in die Leitung einschaltet. In Fig. 246 bedeutet C einen Kondensator, dessen beide Belegungen mit den Polen einer Stromquelle S verbunden sind. In die Leitungen sei bei G eine Glühlampe, bei M ein Amperemeter eingeschaltet. Wenn die Stromquelle S Gleichstrom liefert (z. B. eine Akkumulatorenbatterie oder eine Dynamomaschine für Gleichstrom ist), so fließt kein Strom in dem Kreis, das Amperemeter macht keinen Ausschlag und die Glühlampe brennt nicht. Durch den Kondensator ist eben der Kreis unterbrochen. Wenn aber S eine Wechselstromquelle ist, z. B. eine Wechselstrommaschine, und M etwa das oben beschriebene Amperemeter für Wechselstrom ist, so zeigt dieses trotz des Kondensators eine gewisse Stromstärke an, und die Glühlampe leuchtet. Wechselströme fließen also auch in dem ungeschlossenen, durch den Kondensator unterbrochenen Kreis.

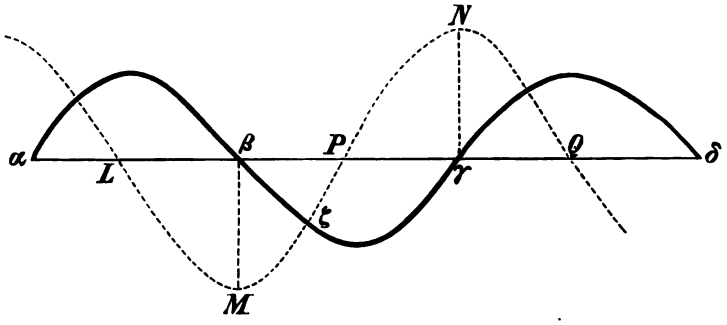
Fig. 246.



In der ersten Hälfte einer Periode nämlich, in der etwa der Pol a positiv ist, wird A positiv, B negativ geladen. Wenn dann die Richtung der Pole wechselt, so wird B positiv und A negativ geladen. Es fließen also fortwährend wechselnde Ladungsströme durch die Leitung, und diese erregen das Amperemeter und die Glühlampe. Aber gleichzeitig verlaufen auch in dem Stromkreis Entladungsströme des Kondensators, und der wirkliche Strom setzt sich aus den Ladungsströmen und den Entladungsströmen zusammen. Daß solche Entladungsströme stattfinden, und wie sie wirken, läßt sich sofort einsehen. Wenn A im Maximum positiv geladen ist, B negativ, so hat der Kondensator eine bestimmte maximale Spannungsdifferenz in der einen Richtung, beim Wechsel der Ladungsströme nimmt diese ab, wird Null und geht in die entgegengesetzte Richtung über. Wenn in Fig. 247 die stark gezeichnete Kurve $\alpha\,\beta\,\gamma\,\delta$ den Verlauf des Stromes darstellt, wie er wirklich in der Leitung herrscht, so ist auf dem ganzen ersten Teil von α bis β die eine Klemme in Fig. 246, etwa a, positiv, die Platte A bekommt also fortwährend positive Elektrizitätsmengen in erst zunehmender, dann abnehmender Stärke. Am Schluß ist also die Platte A des Kondensators am stärksten positiv geladen, d. h. der Kondensator sucht sich von A über a b nach B

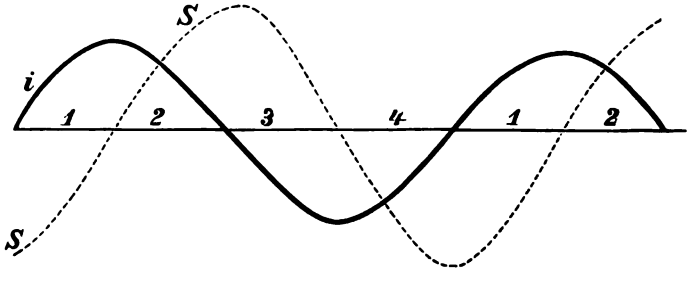
zu entladen. Die Spannung des Kondensators hat also an der Stelle β ein Maximum nicht in der Richtung des Stromes, sondern in der entgegengesetzten Richtung, sie wird also in Fig. 247 durch die Linie β M, die nach unten gezogen ist, dargestellt. Beim Wechsel des Stromes von β über ζ nach γ ist nun a negativ, folglich wird der Kondensatorplatte A negative Elektrizität zugeführt, ihre positive Ladung verringert sich also, sie wird

Fig. 247.



allmählich neutralisiert und am Schluß dieser Halbperiode bei γ ist B positiv geladen, die Spannung sucht einen Strom von B nach A, also in der Richtung des zuerst vorhandenen Stromes α β zu senden, die Spannung hat also den maximalen positiven Wert γ N. Bei L und bei P wird die Spannung 0. Man sieht, die Spannung des Kondensators ist auch wechselnd mit derselben Periode, aber sie hat eine Phasendifferenz gegen den Strom, und zwar eine Phasendifferenz von 90°, da die Maxima der Spannung mit den Nullstellen des Stromes zusammenfallen und umgekehrt.

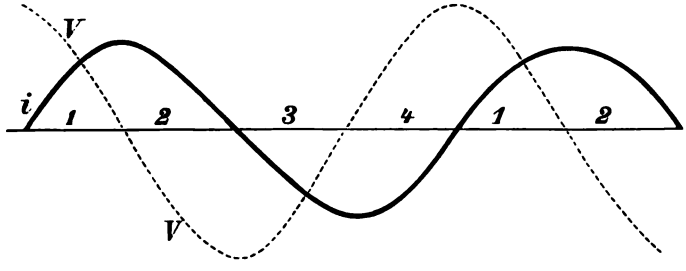
Fig. 248.



Daraus folgt aber sofort, daß der Strom gegen die äußere elektromotorische Kraft eine Phasendifferenz haben muß. Denn der Strom wird hervorgebracht durch die äußere elektromotorische Kraft und durch die Spannung des Kondensators; gegen die Summe dieser beiden ist er ohne Phasenunterschied, gegen die erstere allein hat er also einen Phasenunterschied. Vergleicht man das Zusammenwirken einer äußeren (periodischen) elektromotorischen Kraft einmal mit der des Extrastromes einer Induktionsrolle und dann mit der Spannung eines Kondensators, so findet man bei großer Ähnlichkeit doch einen wesentlichen Unterschied.

In Fig. 248 stellt die mit i bezeichnete krumme Linie den in einer Leitung fließenden periodischen Strom dar, während die punktierte, mit S bezeichnete Linie die elektromotorische Kraft des Extrastromes einer Induktionsrolle in diesem Stromkreis darstellt. Teilt man die ganze Periode in 4 Viertel, wie es in der Figur durch die Zahlen 1, 2, 3, 4 angedeutet ist, so sieht man, daß im ersten und dritten Viertel beide Kurven in gleicher Richtung verlaufen (in 1 nach oben, in 3 nach unten), während sie im zweiten und vierten in entgegengesetzten Richtungen gehen. Dagegen stellt in Fig. 249 wieder die mit i bezeichnete Linie den Strom dar, die punktierte mit V bezeichnete Linie aber die Spannung eines Kondensators. Diese haben im zweiten und vierten Viertel gleiche, im ersten und dritten entgegengesetzte Richtung. Daraus sieht man, daß eine Selbstinduktionsrolle und ein Kondensator eine entgegengesetzte Wirkung auf die Phasenverschiebung haben. Während die Selbstinduktion, wie man sagt, den Strom verspätet gegenüber der elektromotorischen Kraft, hat eine Kapazität (ein Kondensator) im Stromkreis die Wirkung, ihn zu verfrühen. Daraus folgt, daß man die Phasenverschiebung, die durch eine Selbstinduktion in einem

Fig. 249.



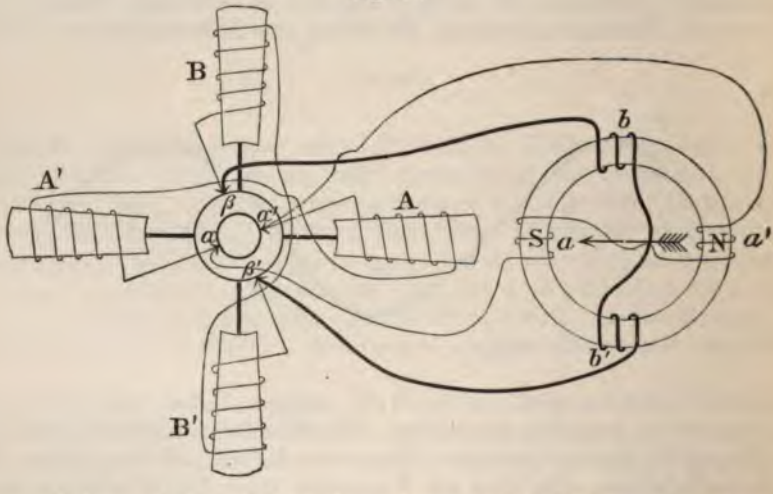
Stromkreis entsteht, wird a u f h e b e n können, indem man noch einen Kondensator in denselben einschaltet. Ein Stromkreis mit Selbstinduktion und Kapazität hat eine geringere Phasenverschiebung als ein solcher bloß mit Selbstinduktion oder bloß mit Kapazität, unter Umständen gar keine.

So unerfreulich kompliziert nun auch die Betrachtung von Wechselströmen infolge der Phasendifferenzen wird, so bringt doch andererseits gerade die Phasendifferenz verschiedener Wechselströme eine Wirkung hervor, die eine sehr große praktische Bedeutung erlangt hat. Wir wollen zwei Wechselströme mit einer Phasendifferenz von 90 ^{0} uns wieder so erzeugt denken, daß wir (Fig. 250) zwei Rollenpaare A A′ und B B′ nehmen, die, um 90 ^{0} gegeneinander verstellt, vor den Polen eines Hufeisenmagnets rotieren. Von den Enden $\alpha\,\alpha'$, des einen Rollenpaares A führen wir die Drähte so, daß sie einen feststehenden Ring aus weichem Eisen an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen umwickeln, wie es die Figur bei a und a′ anzeigt. Auch von den Enden $\beta\,\beta'$ des anderen Rollenpaares wollen wir Drähte zu dem Ring führen, die ihn an zwei um 90 ^{0} von den ersten abstehenden Stellen bei b und b′ umwickeln. Wenn nun die Wechselströme in den beiden Leitungen fließen, so hat vermöge des Phasenunterschiedes der eine Strom in demselben Moment die größte Stärke, in dem der andere gerade die Stärke Null hat. In der Figur ist

die verschiedene Stromstärke in den Umwindungen durch verschieden dicke Linien angedeutet. Man sieht den starken Strom bei b b′, den Strom Null bei a a′. Der Eisenring wird nun durch den Strom in b b′ magnetisiert, und zwar so, daß der Nordpol und Südpol an den Stellen N und S liegen, wie man sich durch die Ampèresche Schwimmerregel überzeugt. Eine Magnetnadel, die im Innern des Ringes sich auf einer Spitze drehen kann, wird also eine Lage annehmen, wie sie durch den großen Pfeil gezeichnet ist.

Wenn nun die Rollen A und B, die die Ströme erzeugen, sich drehen, dann erreichen abwechselnd die Ströme um a a′ und die um b b′, aber nicht gleichzeitig, ein Maximum, werden dann zu Null, bekommen dann wieder einen maximalen, aber negativen Wert u. s. w. Dadurch aber verschieben sich auch die Pole des Ringes. Man erkennt das aus Fig. 251. In I ist der Strom a a′ stark, der Strom b b′ schwach, die Magnetnadel nimmt die gezeichnete Lage ein. Wenn die Rollen, welche die Ströme er-

Fig. 250.

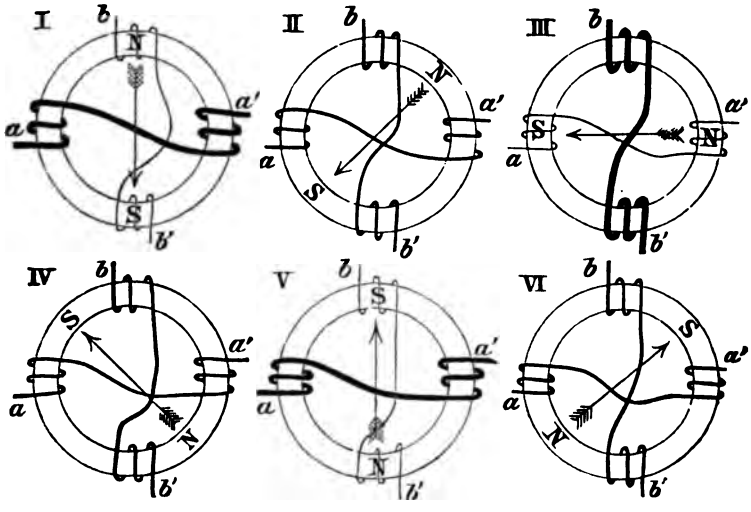


zeugen, sich um 45° gedreht haben, dann sind die Ströme in a a′ und in b b′, gleich stark, so wie es Fig. II zeigt, dann befinden sich die Pole des Eisenringes bei N und S, und die Magnetnadel bekommt die schiefe Lage. In der folgenden Figur ist der Strom b b′ im Maximum, der Strom a a′ gleich Null, die Pole im Ring haben sich also weiter gedreht nach N S und die Magnetnadel ist ihnen gefolgt. Und so geht das weiter. Man sieht als Resultat, daß, wenn die beiden Wechselströme von verschiedener Phase durch die festen Windungen um den festen Ring geleitet werden, daß dann die Magnetnadel im Innern in fortlaufende Drehung kommen muß, daß sie sich so lange drehen muß, als die Ströme fließen. Statt der Magnetnadel können wir auch ein Stück magnetischen Eisens in die Mitte bringen. Dies wird dann erst durch magnetische Induktion magnetisch und muß sich ebenso drehen. Ja auch wenn man einen geschlossenen Drahtkreis, der sich um die Achse drehen kann, hineinbringt, so muß auch dieser sich drehen. Denn es werden in ihm Induktionsströme erzeugt, und diese Ströme, also der ganze Drahtkreis, werden von dem wandernden

Pole angezogen. Diese Erscheinung ist von großer Wichtigkeit geworden, da sie es gestattet, durch Wechselströme Drehungen hervorzubringen und dadurch Arbeit zu leisten. Auf ihr beruhen die sogenannten Induktionsmotoren, die wir im zweiten Abschnitt besprechen werden.

Ein solches System von mehreren Wechselströmen, deren Phasen verschieden sind, hat also wichtige Eigenschaften, welche gerade von dem Phasenunterschied abhängen. Man nennt solche zusammenwirkende Wechselströme Mehrphasenströme. Hat man zwei Rollenpaare, deren Phasenunterschied $90^0 \left(\frac{180^0}{2}\right)$ ist, so erzeugen diese Zweiphasenströme, drei Rollenpaare, deren Phasenunterschied je gleich $60^0 \left(\frac{180^0}{3}\right)$

Fig. 251.

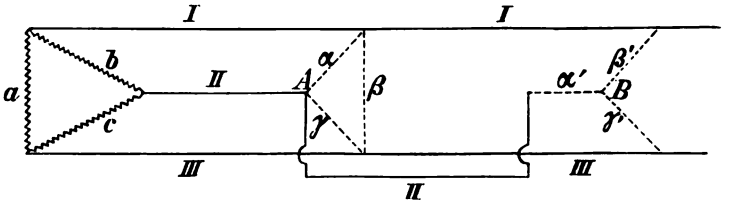


ist, erzeugen Dreiphasenströme, vier Rollenpaare, mit dem Phasenunterschied $45^0 \left(\frac{180^0}{4}\right)$, würden Vierphasenströme erzeugen u. s. w. Dem dreiphasigen Wechselstrom, der am meisten benutzt wird, gibt man auch den kurzen Namen Drehstrom. In jedem Fall erkennt man, daß solche Mehrphasenströme, zweckmäßig um einen eisernen Ring geleitet, bewirken müssen, daß die Magnetpole sich fortlaufend in dem Ring verschieben, und daß daher ein geschlossener Drahtkreis im Innern des Ringes zur Rotation kommen muß. Das ist bisher die wichtigste Bedeutung der Drehströme.

Hat man nun drei Rollen, in denen Wechselströme von verschiedener Phase — die um 60^0 gegeneinander verschoben sind — erzeugt werden, so braucht man zunächst für jede der Rollen 2 Leitungen, um die Ströme nach außen und wieder zurückzuführen, im ganzen also 6 Leitungen. Man kann aber, und das ist praktisch von großer Bedeutung, diese Rollen noch in verschiedener Weise untereinander verbinden. Dann erhält man verkettete Drehströme, deren Verhalten zwar kompliziert

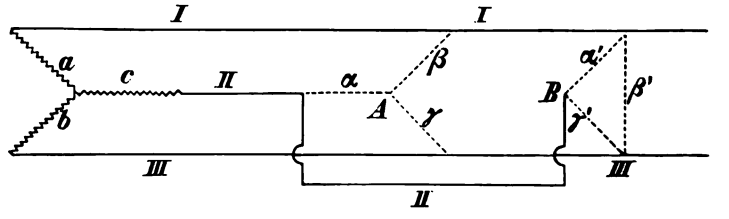
aussieht, aber nicht kompliziert ist. Es seien (Fig. 252) a b c drei Rollen, in denen Drehströme erzeugt werden. Sie haben je 60° Phasenunterschied gegeneinander, so daß, wenn in a die Phase Null ist, in b die Phase 60°, in c die Phase 120° herrscht. Dann kann man die drei Rollen so verbinden, wie es die Fig. 252 angibt. Man sagt dann, die Rollen seien in Dreieckschaltung. Man kann aber auch die drei Rollen so verbinden, wie in Fig. 253, dann sagt man, sie seien in Sternschaltung. Man kann nun sowohl in der ersten, wie in der zweiten Figur von den drei

Fig. 252.



Eckpunkten die Leitungen I, II, III fortführen und diese an irgend welchen Stellen wieder untereinander verbinden, und zwar auch wieder in Dreieckschaltung oder in Sternschaltung. In Fig. 252 und 253 sind jedesmal zwei solche verschiedene Verbindungen gezeichnet. Fig. 252 zeigt die drei Rollen a b c in Dreieckschaltung, die drei Leitungen I, II, III aber sind bei A in Dreieckschaltung durch $\alpha\ \beta\ \gamma$, bei B in Sternschaltung durch $\alpha'\ \beta'\ \gamma'$ verbunden. Fig. 253 zeigt die drei Rollen a b c in Sternschaltung, und die Leitungen sind bei A in Sternschaltung durch $\alpha\ \beta\ \gamma$, bei B in Dreieckschaltung durch $\alpha'\ \beta'\ \gamma'$ verbunden. In jeder der drei Leitungen fließt dann ein Wechselstrom, und man erkennt, daß in jeder der Verbindungs-

Fig. 253.



leitungen $\alpha\ \beta\ \gamma$ oder $\alpha'\ \beta'\ \gamma'$ der Strom eine andere Phase haben muß, so daß also in diesen Verbindungsleitungen Drehstromwirkungen auftreten werden, trotzdem die Rollen verkettet sind.

Das Auftreten dieser Phasenunterschiede als neues Element bei elektrischen Wechselströmen kompliziert zwar die Betrachtungen, aber man sieht ein, daß dadurch die Wechselströme in vielfältigere Kombinationen gebracht werden können als die Gleichströme. Darauf gerade beruht die Bedeutung der Wechselströme für die Wissenschaft und die Praxis, und es hat sich gezeigt, daß die Wechselströme, die lange Zeit wissenschaftlich und praktisch kaum beachtet wurden, an Bedeutung fortwährend gewachsen sind und für die Theorie der Elektrizität wie für ihre Anwendungen sich noch fruchtbarer erweisen als die Gleichströme.

11. Kapitel.

Die elektrischen Schwingungen.

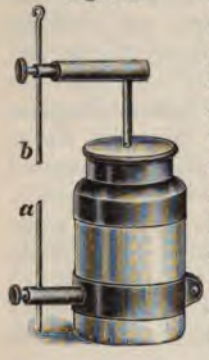
Obwohl es durch die neueren Unterbrecher, den Turbinen- und den elektrolytischen Unterbrecher, möglich ist, einen Strom auf einfache Weise ein- bis zweitausendmal in der Sekunde zu unterbrechen und dadurch in einer Induktionsspule Wechselströme mit der Periode $^1/_{1000}$ bis $^1/_{2000}$ Sekunde zu erzeugen, so sind doch diese Wechsel nur äußerst langsam gegen diejenigen, welche, wie man allmählich erkannt hat, die Natur selbst durch einfache Mittel erzeugt. In Wirklichkeit kommen bei unseren Experimenten, ohne daß wir etwas dazu tun, wechselnde elektrische Ströme vor, die in jeder Sekunde 100 000mal, millionenmal, ja sogar milliardenmal ihre Richtung ändern. Solche außerordentlich rasch wechselnde elektrische Bewegungen nennt man elektrische Schwingungen oder Oszillationen und das Mittel, durch welches sie entstehen, ist der elektrische Funke. Wenn man eine Leydener Flasche durch einen elektrischen Funken entladet, oder wenn man zwischen den Enden einer Induktionsspule einen Funken übergehen läßt, oder wenn man endlich einen beliebigen geladenen Leiter vermittels des angenäherten Fingers durch einen Funken sich entladen läßt, so erhält man jedesmal elektrische Schwingungen. Die Perioden dieser Schwingungen sind außerordentlich kleine, sie variieren je nach der Kapazität der Leiter, zwischen denen der Funke übergeht, von dem zehntausendsten bis zum hundertmillionsten, ja sogar tausendmillionsten Teil einer Sekunde. In allen Fällen aber ist es der elektrische Funke, welcher den Anlaß zu elektrischen Schwingungen gibt. Das ist eine besondere Eigenschaft des elektrischen Funkens, aber wir können leicht erkennen, wieso er dieses tut. Der wesentliche Grund zur Entstehung solcher Oszillationen ist nämlich das Auftreten von Extraströmen bei der Entladung durch einen Funken.

Wir wollen, um dieses einzusehen, die Entladung eines Kondensators oder einer Leydener Flasche genauer betrachten.

Wenn eine Leydener Flasche geladen ist, so befindet sich auf der einen Belegung, etwa der inneren, positive Elektrizität, auf der anderen negative Elektrizität und zwar auf jeder gleich viel, eine gewisse Zahl Coulomb. Wird nun die innere Belegung mit der äußeren durch einen Leiter verbunden, indem man etwa, wie in Fig. 254, jede der beiden Belegungen in einen verschiebbaren Draht ausgehen läßt und die Drähte einander nähert, so fließt die positive Elektrizität von innen nach außen, also in unserer Figur von oben nach unten, die Leydener Flasche wird entladen, und zwar springt ein Funke zwischen den Leitern bereits über, bevor sie noch zur Berührung gekommen sind. Durch die Leiter und diesen Funken geht also die Entladung vor sich, fließt die Elektrizität.

Der ganze Vorgang geschieht zwar in sehr kurzer Zeit, aber man kann doch verfolgen, wie sich in dieser kurzen Zeit die Verhältnisse gestalten. Auf den beiden Belegungen der Flasche ist zunächst eine bestimmte Spannungsdifferenz vorhanden und diese treibt nach dem Ohmschen Gesetz die Elektrizität durch die Drähte und die Luft. Durch diesen Übergang nimmt aber zugleich die Menge der Elektrizität auf jeder der beiden Belegungen ab, da sie sich eben durch den Strom ausgleichen, und daher wird die Spannungsdifferenz auf beiden Belegungen sofort in den aufeinander folgenden Abschnitten der kurzen Zeit während der Entladung immer geringer, und daher nimmt auch die Stromstärke rasch, in äußerst kurzer Zeit, von einem größten Werte an, ab. Da nun aber bei jeder Veränderung der Stromstärke in einem Leiter Extraströme auftreten, so müssen also auch hierbei die Extraströme wirksam sein. Im ersten Moment, wo der Entladungsstrom anfängt, beginnt auch der Extrastrom, welcher die entgegengesetzte Richtung hat wie dieser. Der Entladungsstrom gehe von der Belegung b nach a, dann geht dieser Extrastrom von a nach b. Der eigentliche Entladungsstrom wird nun rasch so schwach, daß dieser Extrastrom überwiegt. Daher bewegt sich im ersten Moment die Elektrizität von b nach a, gleich darauf aber von a nach b. Der Extrastrom nimmt aber ebenfalls an Stärke sofort ab und es entsteht ein neuer Extrastrom, welcher nun wieder von b nach a gerichtet ist und in einem folgenden Moment den ersten Extrastrom überwindet, so daß sich nun die Elektrizität wieder von b nach a bewegt und so fort. Man erhält also tatsächlich das merkwürdige Resultat, daß der Entladungsstrom nicht, wie man eigentlich glauben sollte, direkt von b nach a geht, sondern daß er, gerade wegen der Wirkung der Extraströme, abwechselnd von b nach a, dann von a nach b, dann wieder von b nach a geht u. s. w.

Fig. 254.



Kurz man erhält eine oszillierende Entladung, man erhält elektrische Schwingungen. Damit diese aber eintreten können, müssen die jedesmaligen Extraströme stark genug sein, um die vorhergehenden Ströme zu überwinden, d. h. die oszillatorische Entladung kann nur eintreten, wenn das Selbstpotential der Leitung, durch welches ja die Extraströme bedingt werden, mindestens einen bestimmten Wert hat, welcher in bestimmter Beziehung zu der Kapazität der Leydener Flasche und dem Widerstand der ganzen Leitung steht. Ist diese Bedingung aber erfüllt, so entladet sich eine Flasche oder ein Kondensator tatsächlich oszillatorisch. In bestimmten aufeinander folgenden Zeiten, die allerdings sehr nahe bei einander liegen, kehrt sich die Richtung des Stromes zwischen den beiden Belegungen um. Die Zeit, die zwischen einer Umkehrung des Stromes und der folgenden verfließt, nennt man die Periode der elektrischen Schwingungen. Die Tatsache der oszillierenden Entladung hat zum ersten Male Feddersen bei der Entladung der Leydener Flaschen beobachtet. Er stellte nämlich derjenigen Stelle gegenüber, an welcher der Funke entstehen sollte, einen Spiegel auf, der sich sehr rasch um seine Achse drehte, einen so-

genannten Drehspiegel. In der kurzen Zeit, die der Funke andauert, dreht sich dann der Spiegel um einen Winkel, der um so größer ist, je größer die Drehungsgeschwindigkeit ist. Da nun ein Spiegel einen Lichtstrahl immer unter demselben Winkel zurückwirft, unter dem er aufgefallen ist, so ist klar, daß man das reflektierte Bild des Funkens dabei zu einem Bande, einem Lichtbande ausgezogen zu sehen erwarten mußte. Das war auch tatsächlich der Fall, aber mit einer unvorhergesehenen Modifikation. Es ergab sich nämlich, daß das Bild das Aussehen hatte wie in Fig. 255. Man sieht, daß in dem Lichtband (das photographierte Bilde) eine Reihe von dunklen Stellen mit hellen Zwischenräumen vorhanden ist, ein Beweis dafür, daß die Entladung periodisch aussetzt und wieder beginnt, kurz, daß Oszillationen vorhanden sind. Es gelang auch Feddersen leicht, aus einem solchen Bilde die Periode dieser Oszillationen zu messen. Wenn man nämlich die Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels und den Abstand der photographischen Platte vom Spiegel kennt, so kann man aus der Länge des ganzen Lichtbandes die Dauer des ganzen Funkens berechnen. Ist z. B. der Abstand der Platte vom Spiegel 1 m und dauert der Funken eine Sekunde lang, so würde das Bild des

Fig. 255.

Funkens, wenn der Spiegel sich in dieser Sekunde 500mal vollständig herumdreht, einen Lichtstreifen darstellen, der 1000mal einen Kreis von 1 m Radius umfaßt. Da nämlich das auffallende Licht vom Spiegel immer unter demselben Winkel zurückgeworfen wird, unter dem es auffällt, so wandert das Bild, das der Spiegel entwirft, doppelt so rasch als der Spiegel. Dauert nun der ganze Funke nicht eine Sekunde, sondern etwa $^1/_{10\,000}$ Sekunde, so hat das Lichtband auch bloß den zehntausendsten Teil der Länge (in unserem Beispiel ist im ersten Fall die Länge angenähert $6 \times 1000 = 6000$ m, im zweiten Fall angenähert 0,6 m = 60 cm). So kann man umgekehrt aus der Länge des Lichtbandes die Dauer des ganzen Funkens berechnen. Bei der obigen Figur betrug nun die Dauer des ganzen Funkens etwa $^1/_{70\,000}$ Sekunde. Da nun in dem Funken 15 Schwingungen vorhanden sind, wie man durch Abzählen erkennt, so beträgt die Dauer einer Oszillation etwa eine Millionstelsekunde. In so kurzer Zeit bewegt sich bei diesen Entladungen von Leydener Flaschen die Elektrizität hin und her. Kirchhoff hat dann aus theoretischen Betrachtungen gelehrt, die Periode dieser Oszillationen zu berechnen. Sie hängt nämlich in einfacher Weise von der Kapazität des Kondensators und dem Selbstpotential der angewendeten Leitung ab, und zwar wird die Periode (genauer: ihr Quadrat) um so größer, je größer die Kapazität der Flasche und je größer das Selbstpotential der Leitung ist.

Ebensolche oszillatorische Entladungen treten, wie gesagt — und zwar aus demselben Grunde — auch bei Induktionsapparaten ein, wenn

zwischen deren sekundären Polen Funken überspringen. Nur haben dabei, da das Selbstpotential der Induktionsapparate ein außerordentlich großes ist, die Entladungen eine viel größere Periode. Etwa in dem 10 000sten Teil einer Sekunde geht bei solchen geöffneten Induktionsapparaten die Entladung einmal hin und her.

Daß bei der Entladung durch einen Funken solche periodische Bewegungen entstehen, konnte man allerdings nicht vorhersehen. Nachdem aber die Tatsache einmal konstatiert ist, läßt sie sich auch mechanisch leicht begreifen.

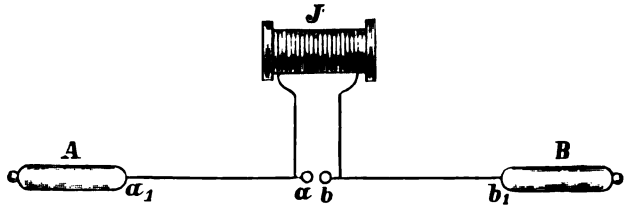
Eine Luftstrecke setzt elektrischen Spannungen im allgemeinen einen solchen Widerstand entgegen, daß sie ihn nicht überwinden können. Wir müssen annehmen, daß der Äther, welcher sich in der Luft befindet, im allgemeinen nicht nachgiebig ist und daß darauf die isolierende Eigenschaft der Luft oder anderer Isolatoren beruht. Wenn aber die Spannungen so groß werden, daß der Funke zwischen zwei Leitern überspringt, so findet ein Durchbrechen des wenig elastischen Äthers in der Luft statt, der Widerstand, den dieser Äther der elektrischen Bewegung entgegensetzt, wird gewaltsam überwunden. Jede Überwindung eines elastischen Widerstandes in der Natur findet aber *periodisch* statt. Wenn wir z. B. bloß Luft aus der gespitzten Mundhöhle hinausblasen, so hören wir einen Ton, und da Töne immer auf periodischen Bewegungen beruhen, so beweist das, daß diese Überwindung des Widerstands periodisch vor sich gegangen ist. Ebenso hören wir bei jedem Zerreißen, Zerbrechen, Zerdrücken von Körpern, bei jedem Schritt, den wir auf der Straße machen, einen Ton, haben also überall eine periodische Bewegung erzeugt. Ganz so wird auch der Äther der isolierenden Luftschicht, wenn er durchbrochen wird, in periodische Bewegungen versetzt. Er schwankt, bei einem solchen Funken, in sehr kurzer Zeit hin und her. Es entstehen daher durch einen solchen Funken in der Luft und in den Drähten, zwischen denen der Funke übergeht, elektrische Schwingungen.

Ebenso wie eine Pfeife um so raschere Schwingungen macht, um so höhere Töne gibt, je kürzer sie ist, je geringer also die in Bewegung versetzte Luftmenge ist, ebenso sind auch bei der Funkenentladung die Schwingungen um so rascher, ist die Schwingungsdauer um so kürzer, je geringer die in Bewegung versetzten Elektrizitätsmengen sind. Große Leydener Flaschen geben daher, wenn sie durch einen Funken entladen werden, langsamere Schwingungen als kleine, und die raschesten Schwingungen erhält man demnach, wenn man zwischen Körpern von sehr geringer Kapazität Funken übergehen läßt. Daß aber außer der Kapazität des Kondensators noch das Selbstpotential der Leiter von Einfluß auf die Schwingungsdauer ist, hat ebenfalls ein Analogon bei den Schallschwingungen. Auch dort spielt die *Form* des Instrumentes eine wesentliche Rolle, gerade wie hier die Form der Drähte. Gerade Trompeten haben bei gleicher Länge einen anderen Ton als solche mit vielen Windungen.

Elektrische Oszillationen müssen also jedesmal eintreten, wenn zwischen zwei geladenen Leitern eine Entladung stattfindet. Nur wird eben die Periode dieser Oszillationen um so kürzer sein, je geringer die Kapazität dieser Leiter ist.

Äußerst rasche derartige Schwingungen hat nun H. Hertz in Karlsruhe zuerst dadurch hervorgebracht, daß er zwischen zwei einander gegenübergestellten Drähten, wie a a_1 und b b_1, in Fig. 256, deren jeder mit einem Zylinder A und B oder mit einer Platte oder Kugel verbunden war, Funken übergehen ließ. Er verband die sekundären Pole eines Induktionsapparates J durch Drähte mit den beiden geradlinigen Leitern a a_1 und b b_1, wodurch zwischen den beiden Endkugeln a und b die einzelnen Entladungsfunken überspringen. Jeder solche Entladungsfunke ist aber auch hier wieder oszillatorisch. Die Entladung geht auch hierbei wieder in Schwingungen vor sich, und da die Kapazität dieser geradlinigen Leiter mit ihren Zylindern oder Platten und ebenso das Selbstpotential der Leitung sehr klein ist, so ist hierbei die Schwingungsdauer dieser Oszillationen sehr klein. Um nicht eine gar zu kleine Schwingungsdauer zu erhalten, vergrößerte er eben die Kapazität der geraden Drähte a a_1 und b b_1 dadurch, daß er sie mit den größeren Metallzylindern A und B verband. Diese vermehren die Kapazität dieses Entladungsapparates und vergrößern daher auch die Dauer einer Schwingung. In solchen Apparaten zählt die Dauer der Oszillationen etwa nach Hundertmillionsteln von Sekunden. Man hat sich den Vorgang bei den Entladungen in einem solchen Apparat also so zu denken: Bei einer Öffnung des primären Stromes in J entsteht ein Induktionsstoß, welcher den Leiter a a_1 A z. B. positiv, den Leiter b b_1 B negativ ladet. Diese beiden entgegengesetzten Elektrizitäten gleichen sich sofort durch die zwischen a und b vorhandene Luftschicht aus, aber dieser Ausgleich geschieht oszillierend, so daß in dem ganzen geradlinigen Leiter a_1 bis b_1 und der Luftschicht dazwischen geradlinige Schwingungen stattfinden. Die Entladung zwischen a und b geht nicht etwa durch den Metalldraht des Induktionsapparates, weil dieser zu großes Selbstpotential hat (also als Drosselspule [S. 247] wirkt), sondern eben durch die Luftschicht. Diese Oszillationen, die, wie gesagt, in etwa dem hundertmillionsten Teil einer Sekunde aufeinander folgen, finden bei jedem einzelnen Öffnungsfunken statt. Sie sind schon vollständig abgelaufen, wenn durch eine neue Öffnung der primären Spule ein zweiter Öffnungsstrom nach a und b gesendet wird. Dieser ladet A und B wieder und die Entladung ist wieder oszillierend u. s. w.

Fig. 256.



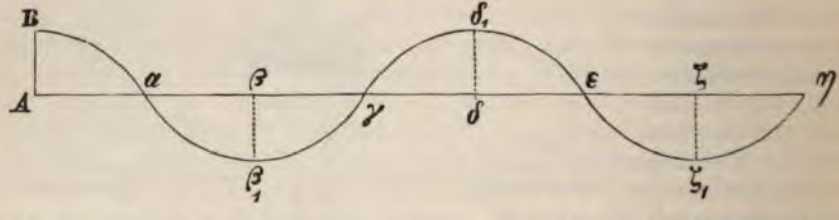
Diese sehr raschen elektrischen Schwingungen haben nun eine äußerst wichtige Bedeutung erlangt durch die Anwendungen, welche Hertz von ihnen machte, und durch welche er das Gebiet der Elektrodynamik ganz wesentlich erweiterte.

Es ist nämlich die oszillierende Bewegung, die in der Funkenstrecke und den sie begrenzenden Leitern stattfindet, nicht auf diese allein beschränkt. Die elektrischen Oszillationen rufen, da eine Wechselwirkung

zwischen den Elektrizitäten und dem Äther stattfindet, auch eine oszillierende Bewegung des Äthers hervor. Wird aber der angrenzende Äther in periodisch hin und her gehende Bewegung versetzt, so muß sich diese auch von da aus nach allen Seiten durch den Äther ausbreiten, es müssen von der Funkenstrecke aus Ätherwellen nach allen Richtungen fortlaufen, ganz so wie von einem brennenden Streichholz Lichtwellen, d. h. Ätherwellen nach allen Richtungen ausgehen. Vorausgesetzt ist dabei allerdings, daß diese elektrischen Bewegungen des Äthers eine meßbare Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben, daß nicht momentan, ohne Zeitverlust, sondern in bestimmter, wenn auch sehr kurzer Zeit die Bewegung von einem Ätherteilchen zu einem benachbarten kommt. Auch bei dem Licht kommt nur dadurch der Äther rings um einen leuchtenden Körper in fortschreitende Wellenbewegung, daß eben das Licht Zeit zu seiner Fortpflanzung braucht.

Wenn aber die Induktionswirkungen Zeit zu ihrer Fortpflanzung brauchen, so kann man leicht übersehen, wie sich in der Nähe einer solchen raschen elektrischen Schwingung die Verhältnisse gestalten.

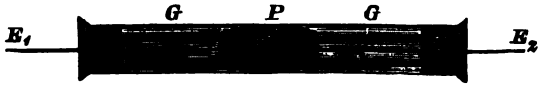
Fig. 257.



Nehmen wir z. B. an, es sei die Geschwindigkeit, mit der die elektrischen Ätherbewegungen sich ausbreiten, 20 Millionen Meter in der Sekunde, so würde folgendes stattfinden. Wir wollen annehmen, daß eine elektrische Oszillation von 1 Millionstelsekunde Schwingungsdauer vertikal auf und nieder geht, etwa zwischen den vertikal gestellten Drähten von Fig. 256. Wenn dann in Fig. 257 diese primäre Schwingung in A B schon eine Zeitlang fortgegangen ist und in einem bestimmten Moment die Bewegung in A B gerade von A nach B geht, so muß in diesem Moment im Punkt β, der 10 m entfernt ist, die Bewegung gerade entgegengesetzt von β nach β_1 gehen, im Punkte δ, der 20 m entfernt ist, wieder, wie in A B, von δ nach δ_1, u. s. f. Mitten zwischen diesen Punkten müssen andere liegen, $\alpha, \gamma, \varepsilon$, in welchen in demselben Moment gar keine Bewegung vorhanden ist, die also in diesem Moment in Ruhe sind. Würde man einen Apparat haben, der die elektrischen Bewegungen an jeder dieser Stellen anzeigte, und würde man solche Apparate in diesem Moment an die Stelle $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$ u. s. w. bringen, so könnte man dann beobachten, wie in β und ζ die Bewegung von oben nach unten, in δ von unten nach oben geht, während je in der Mitte zwischen diesen, in $\alpha, \gamma, \varepsilon, \eta$, in diesem Moment gar keine Bewegung stattfindet. Die Strecke A δ zwischen den beiden Stellen, an denen die Oszillationen gleich groß und gleich gerichtet sind, bezeichnet man als die Wellenlänge der Schwingung. Dieselbe Strecke ist zwischen α und ε oder zwischen β und ζ vorhanden.

Es muß also zunächst, und darauf kommt alles an, ein Instrument gefunden werden, welches das Vorhandensein und die Stärke der elektrischen Bewegung an irgend einer Stelle des Raumes in der Nähe einer Schwingung erkennen läßt. Dieses Mittel fand Hertz darin, daß er an diejenigen Stellen, in denen er die elektrische Bewegung beobachten wollte, einen Leiter brachte, der eine kleine Luftstrecke enthielt, etwa einen zu einem nahezu geschlossenen Kreis gebogenen Draht. Infolge der Induktionswirkungen, die an der Stelle, wo dieser Leiter hingebracht ist, herrschen, entstehen in ihm elektrische Spannungen, die sich durch das Überspringen von kleinen Fünkchen anzeigen. Indes ist die Beobachtung dieser winzigen Fünkchen sehr mühsam, und daher waren die Versuche von Hertz lange Zeit nur mit großen Hilfsmitteln auszuführen. Sie wurden erst bequem anzustellen, als eine Beobachtung eines französischen Gelehrten, Branly, hinzukam, welche die Untersuchung solcher elektrischen Wellen außerordentlich erleichtert. Branly brachte nämlich in eine Glasröhre G wie in Fig. 258 grob gepulverte Metallspäne P und führte in die Glasröhre zwei Elektroden E_1 und E_2 ein, welche das Metallpulver berührten. Da der Kontakt zwischen den einzelnen lockeren Metallteilchen ein sehr schlechter ist, so hat ein solches System einen außerordentlich großen Leitungswiderstand, der nach Hunderttausenden von Ohm zählt. Ein Strom von einem galvanischen Element geht also nur in minimalen Beträgen durch eine solche Röhre hindurch. Sowie aber, und das war die Entdeckung von Branly, eine elektrische Welle auf diese Röhre fällt, treten zwischen den einzelnen lockeren Metallteilchen minimale, unsichtbare Fünkchen auf, welche die Oberfläche zweier benachbarten Metallspäne aneinander schweißen. Dadurch wird der Kontakt zwischen ihnen sofort ein guter und der Widerstand der Röhre sinkt sofort auf einen kleinen Betrag, etwa 5 oder 10 Ohm, herunter. Dasselbe galvanische Element, das vorher kaum einen Strom durch die Röhre hindurchgebracht hatte, liefert daher jetzt einen ganz kräftigen Strom hindurch.

Fig. 258.



Eine solche Röhre mit Metallpulver — man kann Eisen-, Nickel-, Silberpulver oder anderes nehmen — ist also ein sehr feines Reagenzmittel auf elektrische Wellen. Man bezeichnet einen solchen Apparat als Kohärer, ein abscheulich gebildetes Wort, welches anzeigen soll, daß die lockeren Metallteilchen durch die Wellen kohärent werden. In Deutschland braucht man nach dem Vorschlag von Slaby häufig die Bezeichnung Fritter, obwohl solche international gebrauchte Apparate auch mit einem internationalen, d. h. aus dem Lateinischen oder Griechischen entnommenen Namen belegt werden sollten. Um den Kohärer anzuwenden, bildet man, wie Fig. 259 zeigt, einen Stromkreis aus einem Element E, dem Kohärer C und einem Galvanoskop G. Solange das Pulver im Kohärer locker ist, macht der Zeiger des Galvanoskops keinen Ausschlag. Sobald aber elektrische Wellen auf C fallen, fließt der Strom von E durch C und G, und das Galvanoskop schlägt aus. Einen Übel-

stand dieser Anordnung erkennt man aber sofort. Sobald einmal die Wellen auf den Kohärer gefallen sind, hat dieser einen kleinen Widerstand erlangt und behält diesen natürlich auch bei, wenn die Wellen aufhören. Es ist ja kein Grund dafür vorhanden, daß die zusammengeschweißten Teilchen sich wieder trennen sollten. Man braucht aber dann nur die Röhre etwas durch Anklopfen zu erschüttern, dann lagern sich die Teilchen wieder locker an und der große Widerstand ist wieder da, der Kohärer kann von neuem funktionieren. Da nun aber dieses Anklopfen mit der Hand lästig ist, so ersetzt man das vorteilhaft durch eine selbsttätige Anordnung. Man läßt nämlich den Strom von dem Element, sobald der Zeiger des Galvanometers ausschlägt, durch eine elektrische Klingel gehen, deren Klöppel den Kohärer anstößt, so daß dieser wieder den großen Widerstand annimmt. Eine solche Schaltung zeigt Fig. 260. Vom Element E geht der Strom vermittels b f durch den Kohärer C, dann durch e, d zum Galvanoskop G und von dem Kontakt 1, an welchem der Zeiger des Galvanoskops in der Ruhe anliegt, durch c a zum Element zurück. Sowie nun der Zeiger des Galvanoskops ausschlägt und an 2 anliegt, geht der Strom von E durch b, f zur Klingel K und durch 2, c, a zum Element zurück. Der Kohärer wird dadurch erschüttert und kann wieder funktionieren. Eine Ansicht eines derartig eingerichteten Apparates gibt Fig. 261, in welcher die einzelnen Teile ebenso bezeichnet sind wie in Fig. 260; insbesondere ist C der Kohärer, K die Klingel, G das Galvanometer.

Fig. 259.

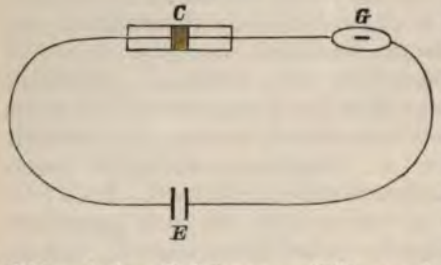
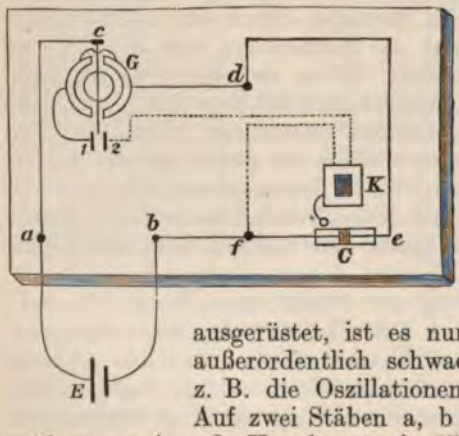


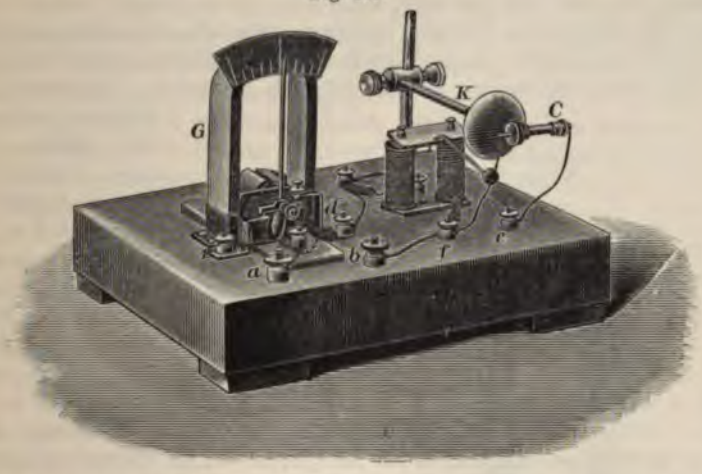
Fig. 260.



Mit einem solchen Kohärer ausgerüstet, ist es nun leicht, elektrische Wellen, auch außerordentlich schwache, zu erkennen. Wir erzeugen z. B. die Oszillationen in einem Apparat wie Fig. 262. Auf zwei Stäben a, b sitzen, um die Kapazität zu vergrößern, zwei große Kugeln von je 15 cm Durchmesser, K und K. Am Ende jedes Stabes ist je eine kleine Kugel F F angebracht, zwischen denen die Funken übergehen. Diese kleinen Kugeln läßt man am besten nicht in Luft, sondern in Petroleum, das in dem Glasgefäß G sich befindet, einander gegenüberstehen, zu welchem Zweck die Stäbe rechtwinklig umgebogen sind. Die Anwendung des Petroleums hat den Vorteil, daß beim Funkenübergang die Kugeln nicht oxydiert werden, was der Entstehung der Wellen hinderlich ist. Der Strom von einem Induktionsapparat wird dem Leitersystem bei a und b zugeführt. Die

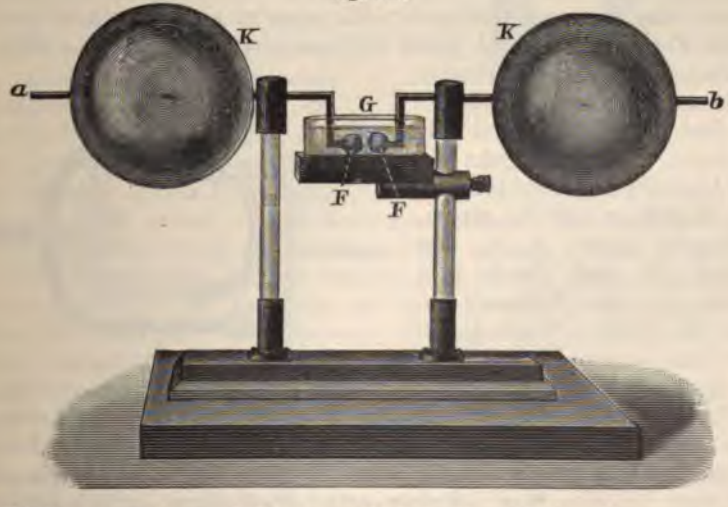
Funken, die zwischen F und F entstehen, erzeugen dann Wellen, deren Länge noch einige Meter beträgt, also sehr groß ist. Daher verbreiten sich diese Wellen ganz wie Schallwellen überall in einem Zimmer, und

Fig. 261.



wo man auch den Kohärer hinstellt, meterweise entfernt von der Funkenstrecke, überall reagiert er, überall tönt seine Klingel und schlägt sein Galvanometer aus. Diese langen Wellen gehen eben nicht geradlinig fort wie die kurzen Wellen des Lichtes, sondern sie breiten sich nach

Fig. 262.

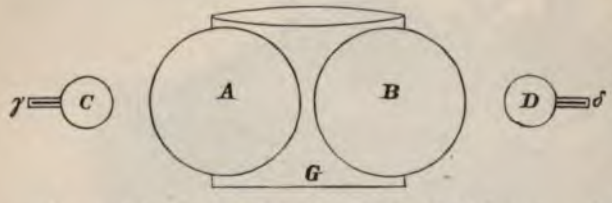


allen Richtungen aus und biegen sich bei allen Hindernissen um wie die Schallwellen, die ja auch leicht um Ecken herum gehen.

Will man Wellen von geringerer Länge haben, die sich nicht so leicht nach allen Seiten ausbreiten, so muß man die Funken zwischen

viel kleineren Leitern, zwischen Leitern von geringerer Kapazität erzeugen. Man erhält solche äußerst rasche Schwingungen, von denen etwa 2 Milliarden in einer Sekunde aufeinander folgen würden, durch eine von Righi angegebene Anordnung, die in Fig. 263 schematisch gezeichnet ist und die wir den Righischen Oszillator nennen wollen. Die wirksamen Funken springen zwischen zwei Kugeln A und B über, welche zur Hälfte in die Wände eines Ebonitkästchens G eingelassen sind und zwischen denen Petroleum sich befindet. Außerhalb dieser Kugeln, aber nahe bei ihnen, stehen zwei Kugeln C und D mit Ansätzen, an welche bei γ und δ die Leitungen von dem Induktionsapparat oder der Influenzmaschine angelegt werden.

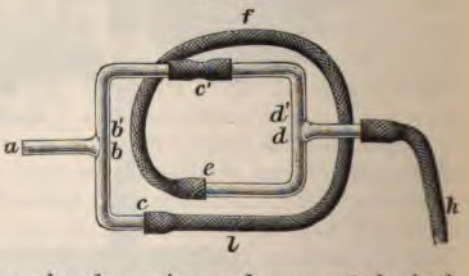
Fig. 263.



Bei dem Spiel des Funkeninduktors springen Funken zwischen C und A und zwischen D und B über und zugleich zwischen A und B, und da diese letzteren in dem System A, Petroleum, B erzeugt werden, das eine äußerst geringe Kapazität hat, so haben die entstehenden Wellen außerordentlich geringe Schwingungsdauer.

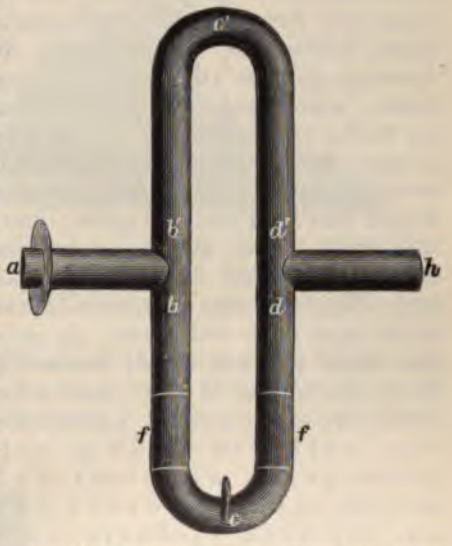
Man kann auf verschiedene Weise die Wellenlänge bestimmen, welche die von diesem Apparat ausgehenden Schwingungen in dem Äther der Luft erzeugen. Am einfachsten geschieht dies dadurch, daß man eine Methode, die in der Akustik zur Messung der Wellenlänge von Schallwellen benutzt wird, auch hier anwendet. Wenn man die Schallbewegung, die etwa von einer angeschlagenen Stimmgabel ausgeht, durch ein Rohr von der Form der Fig. 264 gehen läßt, so tritt folgendes ein. Hält man die Stimmgabel an die Öffnung a, so pflanzt sich die Wellenbewegung dort bis b b′ fort und teilt sich dann. Einerseits geht sie durch b′ c′ d′ zu dem Schlauch h, den man etwa in das Ohr steckt, andererseits durch b, c, den Schlauch l f und durch e, d ebenfalls in den Schlauch h. Wenn die beiden Wege gleich lang wären, so würde auf ihnen auch die gleiche Zahl von Wellen vorhanden sein, und man würde in h den Ton laut hören. Auch wenn die Wege ungleich lang sind, wird man doch in h den Ton laut hören, wenn nur der Schlauch l f so lang ist, daß der eine Weg um eine ganze Anzahl Wellen länger ist als der andere. Wenn aber der eine Weg um eine halbe Wellenlänge größer ist als der andere, so trifft im Schlauch h ein Wellenberg mit einem Wellental zusammen und diese Bewegungen heben sich auf, man hört nichts. Verlängert man aber den Schlauch l f von da an successive, so wird der Ton erst wieder entstehen und dann bei weiterer Verlängerung wieder

Fig. 264.



verschwinden u. s. w. Die Verlängerung, die der Schlauch erfahren mußte, zwischen einem Verschwinden des Tones und dem nächsten ist gerade gleich zwei halben Wellenlängen des angewendeten Tones. Man kann also daraus diese Wellenlänge bestimmen und tut das in der Akustik auch. Nun aber können wir ganz dasselbe Experiment auch mit unseren elektrischen Wellen machen. Wir benutzen dazu den Apparat Fig. 265. Aus Metall haben wir eine Doppelröhre geformt, so daß eine elektrische Welle, die von dem Righischen Radiator bei a erzeugt wird, sowohl durch a b f c f d, wie auch durch a b′ c′ d′ nach h kommen kann. Der erstere Weg läßt sich aber variieren, indem bei f zwei gut ineinander passende Röhren ineinander geschoben sind, so daß wir sie nach Belieben, wie bei einer Posaune, ausziehen oder einschieben können. Stellen wir jetzt bei h unseren Kohärer auf, so zeigt er genau dasselbe, was bei dem akustischen Versuch unser Ohr zeigt. Wenn die beiden Wege, auf denen die elektrischen Wellen nach h kommen, gleich lang sind oder um ganze Wellenlängen verschieden sind, so schlägt das Galvanometer des Kohärers kräftig aus. Wenn aber durch Verstellen der Röhre bei f f bewirkt wird, daß die beiden Wege um eine halbe Wellenlänge verschieden sind, so bleibt der Kohärer ganz in Ruhe. Durch diesen Versuch ist erstens bewiesen, daß wir es tatsächlich mit Wellen zu tun haben. Denn das Zusammenwirken zweier solcher elektrischer Bewegungen bringt unter den angegebenen Umständen nicht verstärkte Bewegung, sondern Ruhe hervor, und das ist das Kennzeichen der Wellenbewegung. Zweitens aber können wir auch sofort die Wellenlänge messen, die die Schwingung unseres Righischen Radiators in dem Äther erzeugt. Sie ist nämlich gleich der Verlängerung, die wir dem Wege a b c d h geben müssen, um von einer Ruhelage des Kohärers zu der folgenden zu gelangen. Ein Versuch mit dem oben beschriebenen Radiator ergibt z. B., daß die von ihm erzeugte Wellenlänge gleich 6 cm ist.

Fig. 265.



Aus diesem Versuch können wir aber auch sofort berechnen, wie groß die Geschwindigkeit ist, mit der die elektrischen Wellen sich in dem Äther der Luft fortpflanzen. Denn da während der Dauer einer Schwingung sich die Bewegung gerade um eine Wellenlänge fortpflanzt, so ist allgemein bei jeder Wellenbewegung die

$$\text{Geschwindigkeit der Fortpflanzung} = \frac{\text{Wellenlänge}}{\text{Schwingungsdauer}}.$$

Nun beträgt die Schwingungsdauer in unserem Righischen Radiator

— man kann sie aus den Dimensionen der Kugeln berechnen — etwa 2 Zehntausendmillionstel einer Sekunde. Daraus ergibt sich die

$$\text{Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen} = \frac{6 \text{ cm}}{2 \text{ Zehntausendmillionstelsekunde}},$$

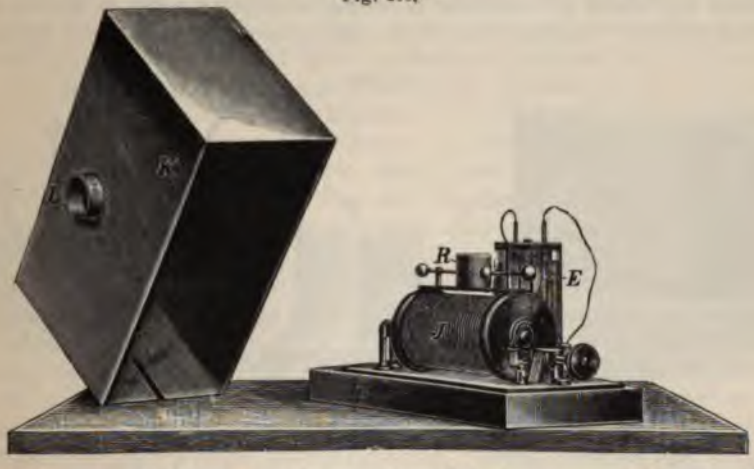
d. i. = 300 000 km in einer Sekunde.

Dieses Resultat ist nun aber von größter Bedeutung. Denn diese Geschwindigkeit ist dieselbe, mit der das Licht sich durch den Raum fortpflanzt. Die elektrischen Wellen durchlaufen also den Raum mit derselben Geschwindigkeit, mit der die Lichtwellen durch den Raum gehen. Da man nun gerade wegen dieser so großen Geschwindigkeit des Lichtes geschlossen hatte, daß die Substanz, in welcher die Lichtwellen verlaufen, ein sehr feiner, elastischer Stoff sein müsse, der Äther, so werden wir jetzt auch schließen müssen, was wir bisher schon antizipiert getan haben, daß diese elektrischen Wellen durch den Äther sich fortpflanzen. Ja wir können noch weiter gehen. Wir können sagen: Lichtwellen und elektrische Wellen sind ganz dasselbe, nämlich Schwingungen des Äthers, nur von ungleichen Größenverhältnissen. Lichtwellen, welche auf unser Auge wirken, haben Wellenlängen, die je nach der Farbe zwischen 4 und 7½ Zehntausendsteln eines Millimeters liegen. Längere Wellen, bis zu 40 oder 50 Tausendsteln eines Millimeters, wirken noch erwärmend, thermisch, auf feine Apparate. Unsere elektrischen Wellen sind zwar sehr viel größer, ihre Wellenlängen sind einige Zentimeter oder Meter. Aber der Unterschied ist doch nur ein gradueller. Ebenso messen umgekehrt die Schwingungsdauern unserer elektrischen Wellen nach Hundert- oder Tausendmillionsteln von Sekunden, die der Lichtwellen sind noch viel kürzer, sie gehen in die Billionstel von Sekunden. Man kann also auf Grund dieser Experimente sagen, elektrische Wellen von sehr kurzer Schwingungsdauer erscheinen uns als Lichtwellen, oder Ätherwellen von verhältnismäßig sehr großer Schwingungsdauer sehen wir nicht mehr als Licht, sondern sie zeigen sich uns durch ihre Induktionswirkungen an, sie sind elektrische Wellen.

Wenn das aber richtig ist — und in den Schlußfolgerungen steckt keine Lücke — so muß es auch möglich sein, mit den elektrischen Wellen ebensolche Erscheinungen hervorzurufen wie mit Lichtwellen. Auch diese weiteren Folgerungen hat zuerst Hertz experimentell bewiesen, und mittels des Kohärers und mit den kleinen Wellen, die unser Righischer Radiator liefert, ist es jetzt leicht geworden, derartige Versuche anzustellen. Da jedoch Wellen von mehreren Zentimeter Länge immerhin schon so groß sind, daß sie nicht wie die Lichtwellen eine ganz geradlinige Ausbreitung zeigen, sondern sich leicht um Hindernisse, um Ecken herum beugen, so ist es für solche Versuche nötig, den Radiator samt dem Induktionsapparat und der Batterie in einen metallischen Kasten einzuschließen, der ein offenes, nicht zu kleines Ansatzrohr hat, so daß nur durch dieses Rohr die Wellen nach außen in die Luft, resp. in den Äther der Luft dringen können. In Fig. 266 ist die Anordnung für diese Versuche gezeichnet. Man sieht rechts bei J den Induktionsapparat, bei E ein Element, das ihn *treibt*, und bei R den Righischen Radiator. Diese Apparate sind so eng

zusammengestellt, daß man über sie den links sichtbaren Metallkasten K schieben kann, so daß die im Radiator erzeugten Funken ihre Wellen durch die Öffnung L des Kastens, und nur durch diese, heraussenden können. Wenn der Radiator in Tätigkeit gesetzt ist, so dringt also aus

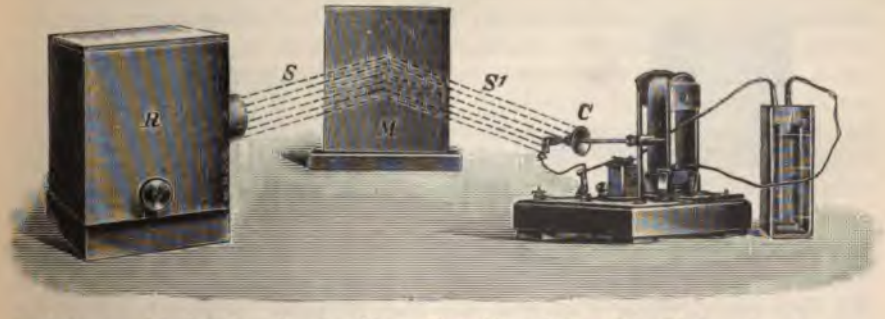
Fig. 266.



dem Rohr ein elektrischer Strahl heraus. Stellt man dann den Kohärer in der Richtung des Strahls in einiger Entfernung auf, so reagiert er. Bringt man ihn aus der Strahlrichtung heraus, so funktioniert er nicht.

Stellt man zwischen den Strahl und den Kohärer einen Schirm aus Metall, so hört der Kohärer auf zu funktionieren. Durch Metalle gehen also die elektrischen Wellen nicht hindurch. Dagegen gehen sie durch

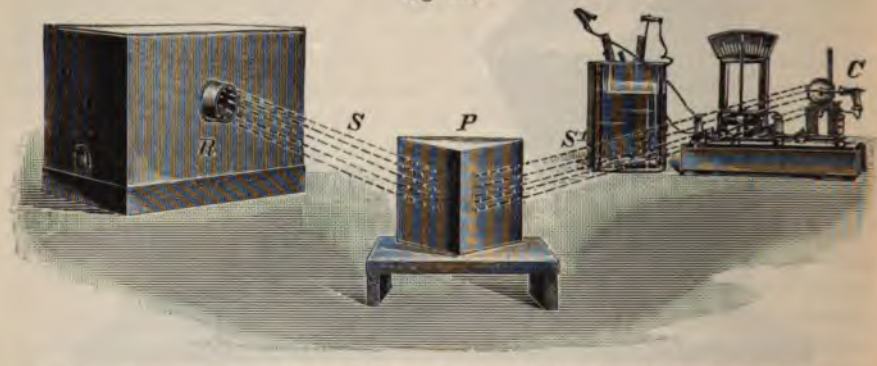
Fig. 267.



Isolatoren hindurch, durch Glas, Paraffin, Schwefel, Holz, durch verschlossene Türen dringen sie aus einem Zimmer in das andere und man kann in einem ganz verschlossenen Zimmer das Galvanoskop des Kohärers ausschlagen sehen, seine Klingel tönen hören, während die elektrischen Wellen außerhalb in einem entfernten Zimmer erzeugt wurden. Stellt man den Kohärer nicht in die Richtung des Strahls, sondern seitlich von ihm auf, so bleibt er in Ruhe. Läßt man aber, wie in Fig. 267, die elek-

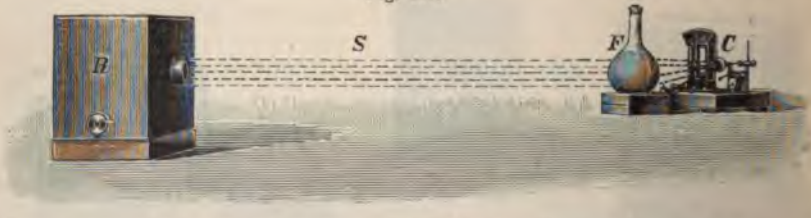
trischen Strahlen S auf ein Metallblech M auffallen, so werden sie von diesem reflektiert, und man kann die Stellung des Metallblechs leicht so wählen, daß die reflektierten Strahlen S_1 auf den Kohärer C fallen und diesen anregen. Die elektrischen Strahlen lassen sich also genau so reflektieren wie Lichtstrahlen. So wie ferner ein Lichtstrahl durch ein Prisma gebrochen, aus seiner geradlinigen Richtung abgelenkt wird, so werden auch die elektrischen Strahlen gebrochen. Bringt man, Fig. 268, ein Prisma P

Fig. 268.



aus Paraffin, etwa von 15 cm Kantenlänge, in den Strahl S hinein, der vom Kasten R kommt, so wird der elektrische Strahl ebenso von der Kante weg gebrochen wie ein Lichtstrahl, und man kann den seitlich stehenden Kohärer C damit zum Ansprechen bringen. Daraus folgt, daß man auch durch Linsen die elektrischen Strahlen in einen Brennpunkt vereinigen können muß. Denn die Wirkung der Linsen beruht ja auch auf der Brechung, wie die der Prismen. Hier bei diesen zentimeterlangen Wellen braucht man mit der genauen Konstruktion der Linsenflächen nicht ängst-

Fig. 269.



lich zu sein. Eine gewöhnliche runde Glasflasche, mit einer isolierenden Substanz, wie Petroleum, gefüllt, wirkt schon als Linse. Stellt man in Fig. 269 den Kohärer C so weit von dem Radiator entfernt, daß er von selbst nicht mehr beeinflußt wird, so kann man durch Zwischenstellen einer solchen als Linse wirkenden Flasche F ihn wieder zum Ansprechen bringen. So lassen sich also alle Erscheinungen, die bei dem Licht bekannt sind, auch mit diesen elektrischen Wellen hervorbringen und die Gleichartigkeit dieser Erscheinungen ist dadurch endgültig bewiesen.

Mit diesen Entdeckungen ist nun ein Verständnis vieler elektrischen *Erscheinungen* erreicht. Die elektrischen Schwingungen pflanzen sich

durch die Luft und überhaupt durch jedes Dielektrikum ebenso fort wie die Lichtschwingungen, d. h. mit der Geschwindigkeit des Lichtes und als Transversalwellen. Die elektrische Bewegung an jeder Stelle des Dielektrikums ist immer senkrecht auf der Richtung, in der diese Bewegung durch das Dielektrikum weiterschreitet. Das ist der Begriff der Transversalwellen. Derartige Wellen finden z. B. an der Oberfläche eines Teiches statt, wenn man einen Stein hineinwirft. Jedes Wasserteilchen bewegt sich, „schwappt" vertikal auf und nieder, aber die ganze Bewegung an sich schreitet (in Kreisen) an der Oberfläche des Teiches entlang. Die schwingende Bewegung jedes Wasserteilchens ist also senkrecht zu den Richtungen, in denen die Wellenbewegung fortschreitet. Ebendasselbe findet statt, wenn irgendwo im Raume ein Streichholz angezündet wird. Von der Flamme aus wird der Äther in schwingende Bewegung versetzt und diese Bewegung schreitet (in Kugeln) nach allen Richtungen fort, jedoch so, daß die Bewegung jedes Ätherteilchens nicht in der Richtung der Fortpflanzung, sondern senkrecht dazu stattfindet. Wir haben Lichtwellen. Und ebenso, wenn wir in einem vertikalen geraden Draht durch elektrische Funken eine elektrische Bewegung auf und nieder erzeugen (das Analogon des brennenden Streichholzes), so pflanzt sich diese Bewegung durch den Äther senkrecht zu dem Draht fort und im Äther macht jedes Teilchen Bewegungen auf und nieder, senkrecht zu der Fortpflanzungsrichtung. Diese vollständige Analogie würde also vermuten lassen, daß man sich die elektrische Bewegung im Äther ganz ebenso erklären könne, wie man die Lichtbewegungen schon lange erklärt hat, nämlich als elastische Bewegungen, also als Bewegungen, wie sie etwa eine angestrichene Violinsaite macht. Indes ist hier noch eine wesentliche Komplikation vorhanden. Jeder elektrische Strom oder, allgemeiner gesagt, jede elektrische Bewegung übt ja, wie wir aus der Lehre vom Elektromagnetismus wissen, magnetische Kräfte aus und zwar sind die magnetischen Kräfte immer senkrecht zu den elektrischen Bewegungen, durch die sie erzeugt werden. Ebenso erzeugen magnetische Kräfte, die sich verändern (also besser magnetische Bewegungen), immer elektrische Bewegungen senkrecht zu ihrer eigenen Richtung. Die Fortpflanzung von elektrischen Transversalwellen im Äther kommt nun dadurch zu stande, daß jede elektrische Bewegung rings um sich, aber senkrecht zu sich, eine magnetische Bewegung erzeugt und daß diese magnetische Bewegung wieder senkrecht zu sich eine elektrische Bewegung erzeugt, die dadurch der ersten parallel wird. Das ist ein ganz anderer Mechanismus der Fortpflanzung, als man ihn gewöhnlich bei elastischen Körpern annimmt. Die Lichttheorie, die das Licht eben als speziellen Fall von elektrisch-magnetischen Schwingungen auffaßt, ist von Maxwell aufgestellt worden und wird die elektro-magnetische Lichttheorie genannt.

Gehen wir aber von dieser kurzen Erörterung über die theoretische Auffassung der Erscheinungen nun wieder zu Tatsachen selbst über!

Die elektrischen Schwingungen, die durch Entladungen von großen oder kleinen Kondensatoren entstehen, sind mit den Lichtwellen von gleicher Natur, indem sie wie diese sich im Äther fortpflanzen und Schwingungszahlen haben, die in die Millionen oder Milliarden gehen. Die

Lichtwellen haben zwar noch größere Schwingungszahlen, in die Billionen gehende, aber jedenfalls sind für unsere Verhältnisse die ersteren sowohl wie die letzteren ganz außerordentlich rasche Schwingungen. In einer anderen Hinsicht aber ähneln die elektrischen Schwingungen viel mehr den Schallwellen als den Lichtwellen, nämlich in Bezug auf die Wellenlänge. Die elektrischen Wellen, welche wir bequem erzeugen können, haben, wie erwähnt, Wellenlängen, die nach Zentimetern oder Metern messen, und von derselben Größenordnung sind auch die Längen der Schallwellen in der Luft. Es hat z. B. der Ton e der eingestrichenen Oktave (e^1) eine Wellenlänge von rund einem Meter in der Luft, das c der viergestrichenen Oktave (c^4) eine solche von 16 Zentimetern u. s. f. Obwohl die angegebenen Töne sehr viel kleinere Schwingungszahlen haben als die entsprechenden elektrischen Schwingungen — nur einige Hundert oder Tausend, gegenüber den Milliarden —, sind doch die Wellenlängen von derselben Größe. Das kommt daher, daß die Schallschwingungen sich in der Luft mit einer verhältnismäßig sehr kleinen Geschwindigkeit (33 000 Zentimeter pro Sekunde) fortpflanzen, während die elektrischen Wellen sich im Äther mit der ungeheuren Geschwindigkeit ausbreiten.

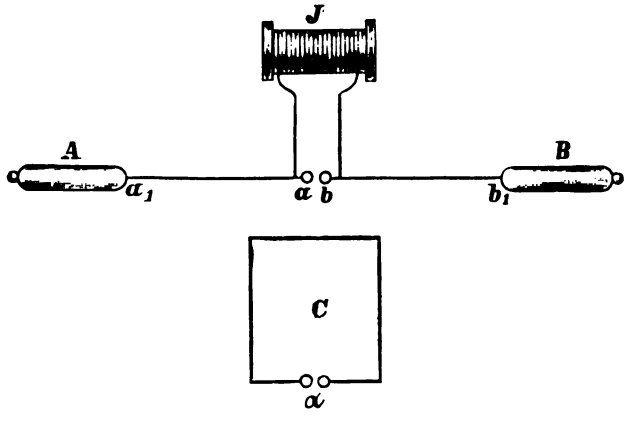
Aus der Vergleichbarkeit aber in den Größenordnungen der Länge der Schallwellen und der elektrischen Wellen ergibt sich, daß man eine Reihe von Schallphänomenen auch leicht durch die elektrischen Wellen nachahmen kann. Das wichtigste und interessanteste dieser Phänomene bietet die Erscheinung der Resonanz. In der Akustik ist es bekannt, daß man durch den Ton eines Instrumentes, einer Pfeife, einer Stimmgabel, einer Glocke oder dergl. ein anderes Instrument zum lauten Tönen anregen kann, wenn der Ton des anregenden Instrumentes mit dem Eigenton des angeregten übereinstimmt. Man sagt dann, das angeregte Instrument tönt durch Resonanz. Man kann diese Erscheinung am leichtesten und deutlichsten zeigen, wenn man Luftsäulen zur Resonanz bringt. Man nimmt zu dem Zweck, wie in Fig. 270, ein hohes Glasgefäß, das man zum Teil mit Wasser füllt, so daß über dem Wasser eine Luftsäule von beliebig zu bestimmender Höhe bleibt. Eine solche Luftsäule kommt nun zum kräftigen Tönen, sobald man an die Öffnung des Glases eine angeschlagene Stimmgabel hält, die gerade den passenden Ton hat, nämlich denjenigen, den die Luftsäule durch ihre Eigenschwingungen selbst erzeugt. Bei einer Reihe von Stimmgabeln wird gerade diejenige eine Verstärkung ihres Tones erfahren, auf welche die Länge der Luftsäule abgestimmt ist. Macht man durch Zugießen von Wasser die Luftsäule kürzer, so wird eine Stimmgabel mit höherem Ton die Resonanz anregen; macht man die Luftsäule länger, so wird es eine tiefere Stimmgabel sein, die anregend wirkt. Die Bedingung für das starke Mittönen, für die Resonanz ist immer die, daß der Eigenton des Resonators übereinstimmt mit dem Ton des

Fig. 270.

anregenden Instrumentes. Diese Eigenschaft der Resonanz ist nun nicht an den Schall gebunden, sondern sie hängt von der Wellennatur des Schalls ab, sie muß sich also bei anderen Wellenbewegungen auch hervorbringen lassen und in der Tat hat Hertz bereits gezeigt, wie man auch bei den elektrischen Schwingungen leicht Resonanz erzeugen kann.

Zu dem Zweck erzeugen wir wieder (wie auf S. 267) elektrische Schwingungen in einem ausgespannten Draht a_1 a b b_1 mit angesetzten Zylindern A B und einer Funkenstrecke a b (Fig. 271), und in die Nähe dieser, wie wir sie nennen wollen, primären Schwingung bringen wir ein Drahtviereck C, das nahezu geschlossen, bloß durch eine kleine Funkenstrecke α, die wir uns regulierbar denken, unterbrochen ist. Die elektrischen Schwingungen in A und B erzeugen durch Induktion natürlich auch elektrische Schwingungen (sekundäre) in dem Drahtviereck C, die sich durch Fünkchen in α anzeigen. Man kann aber diese sekundären Schwingungen bedeutend kräftiger machen — bei gleicher Lage von C gegen den primären Stromkreis —, indem man den Drahtkreis C auf die primäre Schwingung abstimmt, also indem man Resonanz zu erzielen sucht.

Fig. 271.

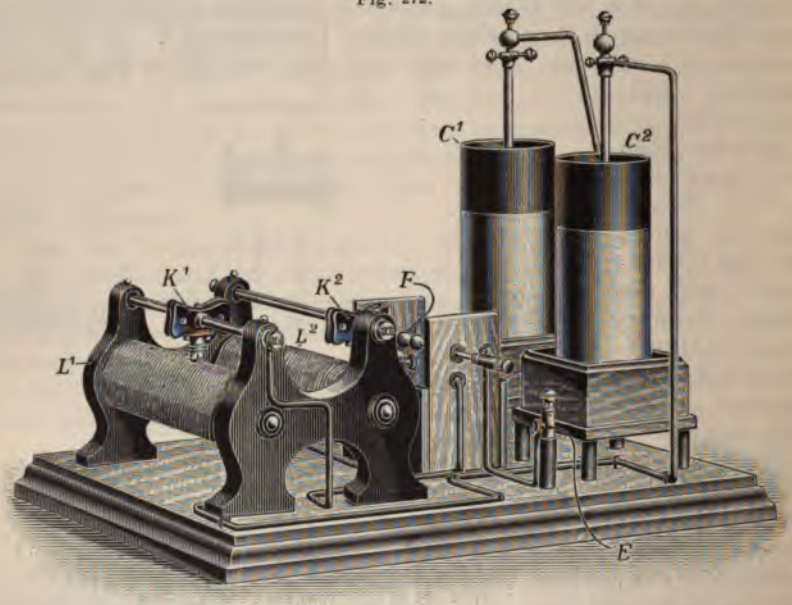


Da die Schwingungszahl elektrischer Schwingungen in einem Drahtsystem nur abhängt von der Kapazität und der Selbstinduktion des Systems, so erkennt man, daß man eine solche Abstimmung erreichen kann, indem man in dem primären System A a b B oder in dem sekundären System C die Kapazität oder die Selbstinduktion oder beide passend ändert. Man kann also z. B. den Zylindern A und B größere Kapazität erteilen, indem man ihre Fläche vergrößert, also etwa indem man Streifen von Stanniolpapier an ihnen befestigt, oder man kann statt der geraden Drähte a a_1 und b b_1 spiralförmig gewundene einführen, wodurch die primäre Selbstinduktion vergrößert wird. Oder man kann ferner an die Drähte von C Stanniolstreifen verschiedener Größe anhängen, wodurch die Kapazität von C verändert wird, oder endlich kann man auch in C statt der geraden Drähte spiralförmige einführen, oder man kann die Länge der Seiten verändern, wodurch immer die Selbstinduktion variiert wird. Durch diese verschiedenen Mittel hat man es in der Hand, den sekundären Drahtkreis C auf die primäre Schwingung abzustimmen, ihn mit ihr in Resonanz zu bringen, was sich immer durch bedeutend stärkere Schwingungen in C, also durch lebhaftere und längere Funken in α anzeigt. Man kann die Resonanz elektrischer Schwingungen, die in der neueren Ent-

wicklung der drahtlosen Telegraphie von erheblicher Bedeutung geworden ist, noch in anderer und glänzenderer Weise hervorbringen.

Um von den in Frage kommenden Verhältnissen in möglichster Kürze und Schärfe sprechen zu können, wollen wir die beiden Systeme, in welchen elektrische Schwingungen stattfinden, als Schwingungskreise bezeichnen und zwar den einen als den anregenden, den anderen als den resonierenden oder mitschwingenden. Also in Fig. 271 ist das Leitersystem A a_1 a b b_1 B der anregende Schwingungskreis, C der resonierende. Diese beiden müssen so zu einander liegen, daß eben die Schwingungen in dem zweiten durch den ersten angeregt werden können.

Fig. 272.

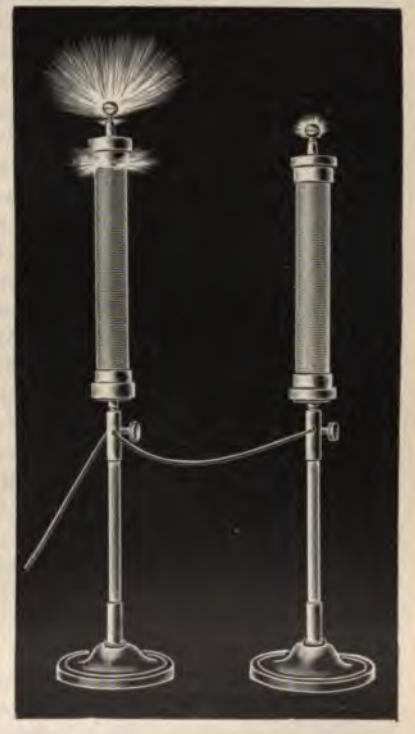


Das ursprüngliche Mittel dazu ist eben dasjenige, welches in Fig. 271 angewendet ist, nämlich daß man den resonierenden Kreis C in die Nähe des anregenden bringt, so daß die elektrischen Schwingungen in ihm durch Induktion entstehen. Man sagt dann, die beiden Schwingungskreise sind miteinander induktiv gekoppelt. Bei dieser induktiven Koppelung kann man aber noch einige Hauptfälle unterscheiden. Wenn nämlich der resonierende Schwingungskreis sehr nahe an dem anregenden ist, so wird die Schwingungsdauer des anregenden Kreises selbst geändert, sie ist nicht mehr dieselbe, wie wenn der resonierende Kreis entfernt wäre. Man kann sich das einfach dadurch klar machen, daß durch die große Nähe des zweiten Kreises ja eine Art Kondensator entsteht, die Kapazität des ersten Kreises wird also dadurch verändert und damit auch seine Schwingungsdauer. Man sagt dann, die beiden Schwingungskreise sind eng gekoppelt. Je weiter man mit dem zweiten Kreis vom ersten fortgeht, desto geringer ist die Rückwirkung desselben, und

man kann eine Entfernung finden, in welcher der resonierende Kreis zwar noch angeregt wird, aber keine merkbare Rückwirkung mehr auf den anregenden ausübt. Die in diesem Falle bestehende (induktive) Verbindung bezeichnet man als lose Koppelung. Von der Energie des anregenden Kreises wird dann ein Bruchteil, sagen wir 5 Proz., auf den resonierenden übertragen und dieser dadurch zu Schwingungen angeregt. Von dessen Energie gehen dann wieder 5 Proz. auf den ersten zurück, so daß dessen Energie nur um $^1/_4$ %, also unmerklich geändert wird.

Man kann aber außer der induktiven Verbindung der beiden Schwingungskreise auch eine direkte, durch einen Draht, zwischen ihnen herstellen, und dann nennt man die beiden Kreise galvanisch oder direkt gekoppelt. Hierbei wird ebenfalls der resonierende Schwingungskreis durch die in regelmäßigem Tempo ankommenden Schwingungen des anderen zu Eigenschwingungen angeregt, wenn seine Eigenschwingungsdauer mit der des anregenden Kreises übereinstimmt.

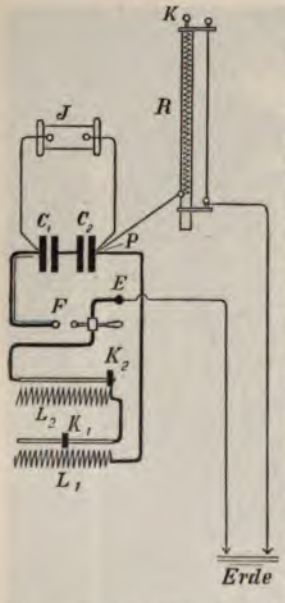
Fig. 273.



Jeder der beiden Schwingungskreise kann nun ein nahezu geschlossener oder ein offener sein. In Fig. 271 ist der anregende Schwingungskreis A B ein offener, bestehend aus zwei langen ausgestreckten Drähten, während der angeregte und resonierende Kreis nahezu geschlossen ist. Zu hübschen Versuchen eignet sich gerade die umgekehrte Anordnung, wobei der anregende Schwingungskreis nahezu geschlossen, der resonierende offen ist, eine Anordnung, wie sie in der Telegraphie ohne Draht jetzt oft benutzt wird. Für Resonanzversuche dieser Art ist von Seibt eine hübsche Anordnung angegeben worden, für welche die Apparate von Ernecke in Berlin ausgeführt werden. Der anregende Schwingungskreis ist in Fig. 272 gezeichnet. Er besteht aus einem Paar Leydener Flaschen C_1 C_2, welche die Kapazität, ferner aus aufgewickelten blanken Drähten L_1 L_2, welche das Selbstpotential desselben im wesentlichen bestimmen, und von denen durch die Schieber K_1 K_2 mehr oder weniger Windungen eingeschaltet werden können, und endlich aus einer Funkenstrecke F. Der resonierende Schwingungskreis ist ein offener und zwar besteht er nicht aus einem geraden Draht, sondern vielmehr aus einer Drahtspule, oder auch aus zwei parallel geschalteten ähnlichen Drahtspulen, von verschiedener Dicke und Windungszahl, wie sie Fig. 273 zeigt. Die Verbindung der beiden Schwingungskreise geschieht nun durch

galvanische Koppelung und in Fig. 274 ist das Schema der zusammengekoppelten beiden Kreise gezeichnet. Durch einen Induktionsapparat J werden in dem primären Schwingungskreis Funken erregt, die nun zu Oszillation Veranlassung geben. Durch den Induktionsapparat werden die Leydener Flaschen C_1 C_2 geladen bis ein Funke bei F überspringt. Dieser erzeugt in dem ganzen Kreis (F, C_1 C_2, variable Selbstinduktion K_1 K_2, E) die raschen Oszillationen. An den Punkt P ist nun der resonierende offene Schwingungskreis, die Spule R angeschlossen. Diese kann entweder oben bei K frei endigen oder sie kann, wie in der Figur, mit der Erde verbunden werden, zu welcher dann auch der Punkt E abgeleitet wird.

Fig. 274.

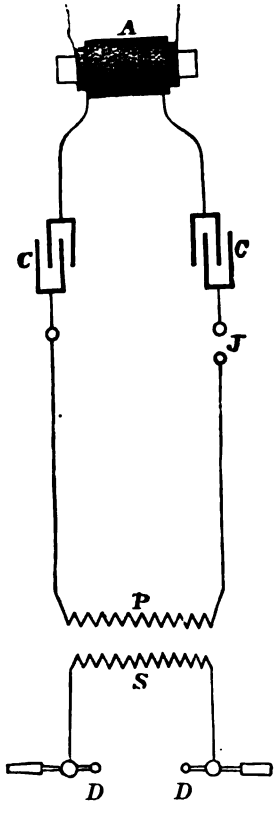


Durch die in dem anregenden Schwingungskreise stattfindenden Oszillationen werden nun die gekoppelten Spulen angeregt, und zwar dann, wenn ihre Eigenschwingung mit der des anregenden Kreises übereinstimmt. Die letztere kann man aber durch die variable Selbstinduktion L_1 L_2 in ziemlich erheblichen Grenzen ändern. Koppelt man also z. B. die beiden Spulen von Fig. 273 an P an und erregt man den primären Schwingungskreis durch den Induktionsapparat, wobei man erst die Selbstinduktion L_1 L_2 ganz ausschaltet, so hat man sehr hohe Schwingungszahlen, auf welche die beiden Spulen nicht reagieren. Schaltet man aber mehr und mehr Selbstinduktion ein, so kommt man zu einem Punkt, wo die eine der beiden Spulen erheblich angeregt wird. Man erkennt das daran, daß aus ihrem oberen Ende starke bläuliche Funken ausspritzen, wie es an der einen Spule in der Figur gezeichnet ist. Der primäre Schwingungskreis ist jetzt in Resonanz mit dieser Spule, während die andere ruhig ist. Vergrößert man die Selbstinduktion L_1 L_2 weiter, so hört die eben spritzende Spule auf, Funken zu sprühen, die Resonanz ist nicht mehr vorhanden und man kommt nach allmählichem weiteren Hinzufügen von Selbstinduktion zu einem Punkt, wo die zweite Spule anfängt zu sprühen. Man findet, daß das stärkste Funkensprühen sich sehr scharf markiert, kleine Verschiebungen des Schiebers auf L_1 L_2 genügen, um dasselbe hervorzubringen oder zu unterdrücken. Auf diese Weise läßt sich also die Resonanz der Spulen mit dem anregenden Schwingungskreis deutlich erkennbar machen, sie ist ebenso deutlich, wie in der Akustik das Mitschwingen einer abgestimmten Luftmasse mit einer angeschlagenen Stimmgabel. An dem freien Ende einer solchen galvanisch gekoppelten Spule ist immer ein Maximum der Spannung vorhanden, ein sogenannter Spannungsbauch, weil eben dort die Elektrizität nicht abströmen kann. Verbindet man dagegen dieses Ende mit der Erde, so bildet sich dort, wegen des freien Abflusses der Elektrizität, ein Minimum der Spannung, ein Spannungsknoten. Bei den Anwendungen dieser Erscheinungen in der draht-

losen Telegraphie wird auf diese Verhältnisse noch ausführlicher zurückzukommen sein.

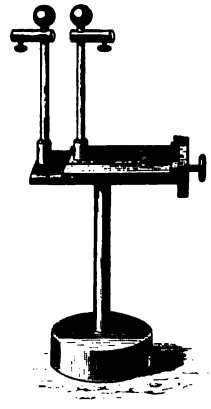
Die elektrischen Schwingungen, die Hertz in so genialer Weise zur Auffindung neuer Erscheinungen benutzt hat, sind in anderer Weise von Tesla zur Hervorbringung sehr interessanter und merkwürdiger Phänomene benutzt worden. Tesla arbeitete zwar nicht mit so raschen Oszillationen wie Hertz, sondern nur mit den Schwingungen, die bei den Entladungen großer Leydener Flaschen entstehen. Dafür aber erzeugte er bei seinen Versuchen sehr viel höhere Spannungen als Hertz und studierte die auffallenden Erscheinungen, die bei solchen immerhin sehr raschen Oszillationen bei hoher Spannung auftreten.

Fig. 275.



Um den elektrischen Schwingungen hohe Spannung zu erteilen, benutzte er das Prinzip der Transformation. Wenn man Leydener Flaschen durch eine starke Elektrizitätsquelle ladet und dann durch einen Funken entladet, so erhält man elektrische Oszillationen, deren Zahl in einer Sekunde viele Hunderttausende bis etwa eine Million ist. Diese sehr rasch wechselnden Ströme läßt nun Tesla durch eine primäre Induktionsspule von sehr geringem Widerstand gehen und erhält also in dieser Spule Wechselströme von großer Schwingungszahl (Frequenz) und verhältnismäßig großer Stromstärke. Um die primäre Spule ist nun eine sekundäre Spule mit sehr vielen Windungen eines dünnen, vorzüglich isolierten Drahtes gelegt. In dieser werden Induktionsströme erzeugt von derselben Schwingungszahl (Frequenz), aber von außerordentlich hoher Spannung, weil die Zahl der Windungen in der sekundären Spule groß ist und weil eben der primäre Strom in so sehr kurzer Zeit seine Stärke und Richtung ändert.

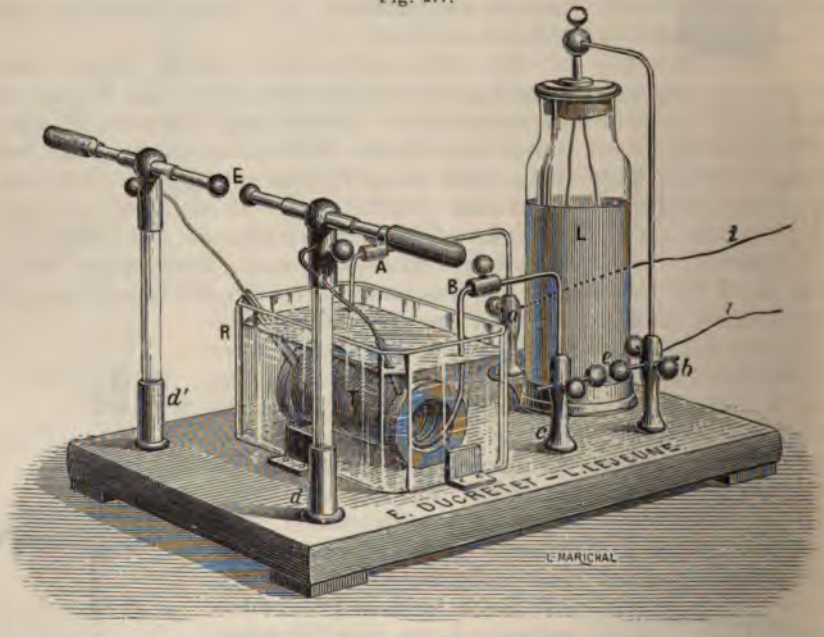
Fig. 276.



Diese Anordnung von Tesla ist in Fig. 275 schematisch gezeichnet. Durch einen großen Funkeninduktor A werden die Leydener Flaschen C C' geladen, indem die Pole der sekundären Spule des Funkeninduktors mit den beiden inneren Belegungen der Flaschen verbunden werden. Die äußeren Belegungen (die entgegengesetzt geladen sind) sind durch eine Funkenstrecke J und die primäre Induktionsspule P miteinander verbunden. Die sekundäre Spule S ist dann diejenige, an deren Polen D D sehr hohe Spannungen mit sehr großer Frequenz auftreten. Die beiden Spulen P und S in dieser Anordnung bezeichnet man zweckmäßig als Teslaschen

Transformator. Die Funkenstrecke J wird am besten aus einem Funkenmikrometer (Fig. 276) gebildet. Zwei Kugeln (mit Klemmschrauben) sind auf Glasfüßen befestigt, von denen der eine feststeht, während der andere mit seiner Kugel auf einem Schlitten vermittels einer Schraube bewegt werden kann. Man nähert die bewegliche Kugel der festen so weit, bis regelmäßig Funken überspringen. Die primäre Induktionsspule P und die sekundäre Spule S müssen, wegen der hohen Spannungen, sehr sorgfältig voneinander isoliert werden und in der letzteren müssen auch die einzelnen Windungen mit großer Sorgfalt voneinander isoliert werden. Das geschieht am besten dadurch, daß man die dünnen

Fig. 277.



Drähte der sekundären Spule mit einem sehr guten Isolator (Paraffin) umkleidet und die ganze Spule in ein Gefäß voll Öl stellt, das man durch Auspumpen sorgfältig von aller Luft befreit.

Man kann auch eine Leydener Flasche allein anwenden und deren beide Belegungen mit den beiden Polen des Ruhmkorff verbinden und sie dadurch laden lassen. Die Entladung geschieht dann dadurch, daß man die beiden Belegungen wieder durch eine Funkenstrecke und die primäre Spule des Teslaschen Transformators miteinander verbindet.

Eine Ansicht dieser Zusammenstellung für die Teslaschen Versuche zeigt Fig. 277. Man sieht die Leydener Flasche L, die von dem (nicht gezeichneten) Induktionsapparat vermittels der Drähte l und i geladen wird. Die Entladung der Flasche geht von der inneren Belegung durch die Funkenstrecke e, dann durch die inneren (primären) Windungen des Teslatransformators T, welcher in dem ölgefüllten Gefäß R liegt, nach A und dann zur äußeren Belegung bei a. Die sekundäre Rolle des Trans-

formators hat ihre Enden in den beiden auf Glasfüßen stehenden Kugeln E, die gegeneinander verschiebbar sind.

Die auffallendsten Erscheinungen nun, die diese sehr hochgespannte Elektrizität bietet, sind Lichterscheinungen. An den Polen der sekundären Spule sprühen senkrecht nach außen blaue Lichtbüschel. Wenn man die Pole der sekundären Spule einander nähert und einen Luftstrom gegen den Zwischenraum bläst, so erhält man eine Flammenmenge zwischen den Polen, die aus dünnen und dicken silberglänzenden Fäden besteht und gewissermaßen ein Netzwerk von elektrischen Funken darstellt.

Bringt man an einem der Pole einen langen Draht an, der am Ende isoliert ist, so schießen auch bei diesem auf der ganzen Länge desselben

Fig. 278.

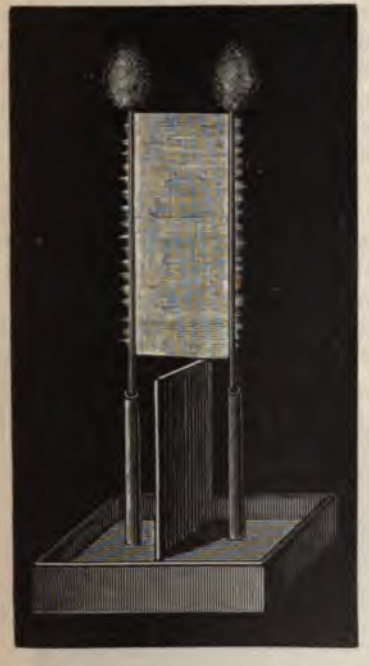


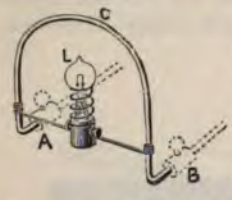
Fig. 279.

bläuliche Strahlen senkrecht zum Draht hervor. Legt man an beide Pole je einen Draht und führt dieselben parallel zu einander in nicht zu großer Entfernung, so schießen die Strahlen von dem einen Draht zum anderen über und bilden ein langes, schmales, bläulich-weißes Lichtband, wie es Fig. 278 darstellt. Man kann diesen Versuch vielfach variieren. Einen hübschen Anblick gewährt er in folgender Form, die in Fig. 279 dargestellt ist. Der eine Pol der sekundären Spule ist mit einem kleinen Drahtkreis, der andere mit einem größeren verbunden und die Strahlen gehen nun fast kontinuierlich zwischen den beiden Kreisen über und bilden einen leuchtenden Kegelstumpf.

Die Entladungen gehen bei diesen Versuchen leichter durch die Luft

als durch Drähte. Dies ist gerade eine Folge der hohen Wechselzahl. Denn infolge der raschen Änderungen des Stromes werden auch die Extraströme sehr stark, und wenn das Selbstpotential des Drahtes, durch welchen die Ströme gehen sollen, einigermaßen groß ist, so schwächen die Extraströme den Strom so bedeutend, daß er überhaupt nicht durch den Draht gehen kann. Allgemein kommt es für diese raschen Oszillationen nicht auf den Ohmschen Widerstand der Strombahn an, sondern auf die Impedanz (S. 246) derselben, die durch das Selbstpotential bestimmt ist. Die Oszillationen gehen leichter durch eine Luftstrecke von 1 cm Länge, als durch einen Kupferdraht von 2 cm Länge, eben weil das Selbstpotential, das der 2 cm lange Kupferdraht besitzt, größer ist, als das der Luftschicht von 1 cm, während der Widerstand der Luftschicht millionenmal größer ist, als der des Kupferdrahtes.

Fig. 280.



Auf diesem Grunde beruht folgendes interessante Experiment. Wenn man, wie in Fig. 280, einen dicken Kupferstreifen C in den primären Kreis der Teslaschen Anordnung einschaltet und parallel zu ihm eine kleine Glühlampe L schaltet, so leuchtet die Glühlampe. Ein konstanter Strom oder ein Strom mit geringerer Frequenz würde nur durch den dicken Kupferstreifen und bloß zu einem ganz minimalen Bruchteil durch den Kohlenfaden der Glühlampe gehen, da dieser ja sehr viel größeren Widerstand hat, während die raschen Oszillationen hauptsächlich durch die Glühlampe gehen, weil diese eben (wegen der geringeren Länge des Fadens) geringeres Selbstpotential hat.

Berührt man einen der sekundären Pole des Teslatransformators mit einer Geißlerschen Röhre (einer geschlossenen Röhre, in der die Luft

Fig. 281.

sehr verdünnt ist), so leuchtet diese hell auf. Aber auch ohne direkte Berührung leuchten solche Röhren, wenn sie bloß in die Nähe der Pole gebracht werden. Die elektrische Bewegung strahlt eben von den Polen aus, geht durch den Äther hindurch und erregt die verdünnten Gase in Geißlerröhren. Wenn man mit den Polen der Teslarolle je eine Metallplatte verbindet, wie in Fig. 281, und die Platten einander gegenüberstellt, so herrschen in dem ganzen Raume zwischen ihnen starke elektrische

Kräfte, und Geißlerröhren, die frei in diesen Raum gebracht werden, leuchten hell auf. Tesla hat auf diese Erscheinung die Hoffnung gegründet, eine ideale elektrische Beleuchtung einzurichten. Es sollten in dem zu beleuchtenden Raum nur an zwei gegenüberliegenden Wänden derartige große Metallplatten aufgestellt werden und mit den Teslapolen verbunden werden. Dann kann man an beliebiger Stelle des Raumes durch eine Geißlersche Röhre ohne jede Drahtverbindung Beleuchtung hervorbringen. Allerdings ist in diesem Projekt viel aussichtslose Zukunftsmusik enthalten.

Sehr auffallend ist es, daß die elektrischen Oszillationen von hoher Frequenz eine außerordentlich geringe physiologische Wirkung auf den menschlichen Körper ausüben. Wenn man einen gewöhnlichen, langsam wechselnden Induktionsstrom, wie er von einem gewöhnlichen Induktionsapparat geliefert wird, durch den Körper gehen läßt, so erhält man heftige Schläge, die bei großer Intensität des Stromes sogar tödlich werden können. Die raschen Oszillationen dagegen, die bei den Hertzschen und Teslaschen Versuchen angewendet werden, wirken auf den Körper gar nicht oder nur sehr unbedeutend ein. Man kann die Pole der Teslarolle mit den Händen anfassen und die Oszillationen durch den Körper hindurchgehen lassen, man kann solche Funken von einem halben Meter Länge aus dem einen Pol einfach in die Hand schlagen lassen, ohne einen Schmerz zu fühlen. Es beruht das vermutlich auf der außerordentlich geringen Elektrizitätsmenge, die bei dieser Anordnung dann durch den Körper geht.

Aus allen Erörterungen dieses Abschnittes hat sich ergeben, daß sich die Elektrizität fast unmittelbar, fast ohne besondere Hilfsmittel in alle anderen Erscheinungsformen der Naturkräfte umwandeln läßt, eine Eigenschaft, welche die Elektrizität allen anderen Naturkräften voraus hat. Und zu dieser Eigenschaft kommen noch die beiden großen Vorzüge hinzu, daß sich der elektrische Strom mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortpflanzt, und daß er immer auf vorgeschriebenen Bahnen, auf den Leitungsdrähten, bleibt. So kann man die Elektrizität in einem Moment hinleiten, wohin man will, und kann ihre Wirkungen hervorbringen, wo man will, ganz unabhängig von dem Ort, wo man sie erzeugt hat. Die Elektrizität überwindet gewissermaßen Raum und Zeit. Keine andere Naturkraft hat diese brauchbaren Eigenschaften, und daher ist keine andere Naturkraft, selbst die Wärme nicht, in so eminentem Maße anwendbar, wie die Elektrizität.

12. Kapitel.

Der Durchgang der Elektrizität durch Gase. Die Röntgenstrahlen.

In allen bisherigen Kapiteln war von dem Verhalten der Luft oder anderer Gase gegenüber der Elektrizität nur sehr vorübergehend die Rede. Das Verhalten der Metalle, der Flüssigkeiten und der Dielektrika in Bezug auf den Strom wurde ausführlich angegeben, aber nicht das der Gase. Und das mit vollem Grund. Denn die Gase zeigen in Bezug auf ihre elektrischen Eigenschaften ein sehr kompliziertes Verhalten, sie zeigen eine Reihe von sehr verschiedenen Erscheinungen und es ist erst allmählich und nur zum Teil gelungen, in die zunächst verwirrenden Einzelheiten leitende Gesichtspunkte zu bringen und diese Erscheinungen auf einfache Gesetze zurückzuführen.

Die bekannteste elektrische Erscheinung in Gasen ist der elektrische Funke. Wenn zwei entgegengesetzt geladene Leiter einander genähert werden, so springt zwischen ihnen, noch ehe sie zur Berührung kommen, solange sie also noch durch einen Luftzwischenraum getrennt sind, ein heller Funke mit einem knatternden oder zischenden Geräusch über. Durch diesen Funken findet eine Entladung der beiden Leiter statt; denn untersucht man sie nach dem Überspringen des Funkens, so findet man sie unelektrisch. Es ist also während der Dauer dieses Funkens die Elektrizität durch die Luft von dem einen Leiter zum anderen übergegangen. Daß dieser Übergang nicht ein so einfacher ist, wie man zunächst annehmen sollte, sondern ein oszillatorischer ist, haben wir auf S. 263 gesehen. Das kommt aber hier nicht in Betracht.

Fig. 282.

Wie weit die beiden Leiter voneinander entfernt sein dürfen, damit ein Funke zwischen ihnen auftritt, das hängt hauptsächlich von dem Spannungsunterschied zwischen ihnen ab, ein wenig auch von der Form der Leiter. Man bezeichnet den Abstand zweier geladenen Leiter, bei welchem gerade ein Funke überspringt, als die Schlagweite bei der gegebenen Spannungsdifferenz. Je größer der Spannungsunterschied zweier Leiter ist, um so größer ist die Schlagweite. Man bedient sich zur Messung der Schlagweite am besten des Funkenmikrometers Fig. 282, das wir schon auf S. 284 beschrieben haben. Der Abstand der beiden Kugeln, bei dem gerade ein Funke überspringt, gibt also auch ein Maß für die Größe des Spannungsunterschieds, der zwischen ihnen herrscht. Sir W. Thomson (Lord Kelvin) hat zuerst die Spannungsdifferenz absolut in Volt gemessen,

die zu bestimmten Schlagweiten gehört, und aus seinen Untersuchungen und denen anderer ergibt sich folgende Tabelle:

Schlagweite zwischen Kugeln	Spannungsdifferenz in Volt
0,5 mm	2910
1,0 „	4830
3,0 „	11460
6,0 „	20470
10,0 „	25410
15,0 „	29340
20,0 „	31350

Man sieht, daß schon eine Spannung von fast 3000 Volt nötig ist, um einen Funken von einem halben Millimeter Länge zu erzeugen, und daß mit der Größe der Schlagweite die zugehörige Spannungsdifferenz wächst.

Was nun bei diesem Übergang des Funkens durch die Luft geschieht, wie sich die Luftteilchen dabei verhalten, davon hat man noch gar keine Ahnung. Alles, was wir sagen können, ist nur, daß die Luft dem Durchgang der Elektrizität einen sehr großen Widerstand entgegensetzt, der nur durch sehr hohe Spannungen überwunden werden kann.

Zeigt die Luft nun dieses Verhalten unter allen Umständen? Man kann ja die Luft vermittels der Luftpumpen in einem Raum beliebig verdünnen; wird sich auch verdünnte Luft so verhalten? Diese Frage ist erst 1854 von Gassiot in Frankreich und ausführlicher 1858 von Plücker in Bonn experimentell genau untersucht worden. Letzterer hatte sich dabei der Hilfe des berühmten Glasbläsers Geißler in Bonn zu erfreuen, welcher durch seine Kunst die Versuche wesentlich erleichterte. Um Experimente mit verdünnter Luft anzustellen, muß man die Luft in Gefäße (Glasgefäße, wenn man etwas sehen will) einschließen und abschließen. Ein solches Gefäß wird mit der Luftpumpe verbunden, evakuiert, soweit man es will, und dann entweder durch einen Hahn abgeschlossen oder abgeschmolzen. Will man ein Gefäß nicht mit Luft, sondern mit einem anderen Gas in verdünntem Zustand füllen, so muß man erst die Luft ganz auspumpen, dann das andere Gas einfüllen und dies durch Pumpen auf den gewollten Grad der Verdünnung bringen.

Bekanntlich wird der Druck eines Gases gemessen durch die Höhe einer Quecksilbersäule in Millimetern, welcher er das Gleichgewicht hält. Ein Gas unter dem Druck einer Atmosphäre, wie die Luft, die uns umgibt, hat einen Druck von 760 mm (Quecksilber) am Meeresniveau, auf höher gelegenen Orten einen kleineren. Ist also der Druck in einem Gefäß durch Evakuieren auf 1 mm erniedrigt, so ist nur noch der 760. Teil der Luftmenge im Gefäß, die ursprünglich darin war.

Um durch ein verdünntes Gas die Elektrizität hindurchsenden zu können, muß man in das Gefäß, welches das Gas enthält, zwei Drähte einführen (einschmelzen oder einkitten), welche mit der Elektrizitätsquelle verbunden werden können. Diese bezeichnet man hier auch als Elektroden und unterscheidet auch hier die positive Elektrode als

Anode, die negative als Kathode. Die Elektroden können bloße Drähte sein, oder es können Platten oder gekrümmte Flächen an den Drähten befestigt sein, je nach Bedarf. In Fig. 283 ist ein zugeschmolzenes Rohr abgebildet, in dessen beide Enden die Elektroden, und zwar eine Spitze und eine Platte, eingeschmolzen sind.

Fig. 283.

Wenn man nun in einem solchen Rohr die Luft mit der Luftpumpe allmählich verdünnt und die Elektroden des Rohres mit der sekundären Rolle eines Induktionsapparates oder mit einer Elektrisiermaschine verbindet, so findet man eine Reihe von merkwürdigen und zum Teil sehr schönen Erscheinungen. Wir wollen annehmen, daß die Entfernung der Elektroden so groß ist, daß in freier Luft bei der angewendeten Spannungsdifferenz kein Funken zwischen ihnen überspringt. Solange der Druck in der Röhre 760 mm beträgt, zeigt sich überhaupt nichts und es zeigt sich auch nichts, wenn man den Druck allmählich von 760 mm bis auf 10 mm verringert. Nur ganz schwache bläuliche, kurze Strahlen sieht man etwa von 50 mm Druck an von den Elektroden ausgehen. Ist aber der geringe Druck von etwa 10 mm erreicht, so sieht man (Fig. 284) zwischen den beiden Elektroden ein helles, violettes Lichtband sich erstrecken, welches nicht die ganze Breite der Röhre ausfüllt, welches auch nicht ganz geradlinig verläuft, welches sich aber direkt von der einen Elektrode bis zur anderen hinzieht. Macht man den Druck noch geringer, 1—3 mm, so bleibt immer ein solches violettes Licht zwischen den Elektroden, welches aber allmählich die ganze Breite der Röhre ausfüllt. Bei näherem Zusehen aber erkennt man, daß dieses Licht *geschichtet* ist. Es sind auf der ganzen Länge der Röhre abwechselnd helle und dunkle Schichten in nahezu gleichem Abstand voneinander vorhanden. Fig. 285 sucht eine Darstellung der Erscheinung zu geben, wie sie in einer solchen Röhre sich zeigt.

Fig. 284.

Fig. 285.

Röhren von sehr verschiedener, oft sehr kunstvoller Form, mit Gasen gefüllt, welche bis auf 1—3 mm Druck evakuiert sind, wurden zuerst von Geißler in Bonn in den Handel gebracht und heißen deshalb *Geißlersche Röhren*. Durch die leuchtende verdünnte Luft geht die Entladung der Elektrizität vor sich. Ist das Rohr gebogen oder gekrümmt, wie in Fig. 286, *so folgt die Entladung allen Krümmungen* des Rohres und die Elek-

trizität geht auf ihnen durch die verdünnte Luft von der positiven zur negativen Elektrode über.

Die Farbe, in welcher das Gas leuchtet, ist verschieden, je nach der Natur der Gase. Wasserstoff, Stickstoff, Chlor u. s. w. in solche Röhren gebracht, leuchten anders als Luft, ja es ist sogar umgekehrt die Untersuchung dieser leuchtenden Gase in Geißlerröhren mit dem Spektroskop das sicherste Mittel, die Natur eines Gases zu erkennen.

Bei schärferer Beobachtung findet man, daß doch nicht, wie vorher angegeben, die leuchtende Entladung sich von der positiven bis zur

Fig. 286.

negativen Elektrode erstreckt. Vielmehr sieht man, schon bei den angegebenen Drucken, daß die negative Elektrode mit einem bläulichen Lichtschimmer umgeben ist und daß das violette Licht nur bis nahe an dieses bläuliche Licht herankommt, aber doch von diesem noch durch einen kleinen dunklen Zwischenraum getrennt ist. Die leuchtende Entladung geht also von der positiven Elektrode aus, aber nicht ganz bis zur negativen Elektrode hin. Man nennt dieses helle, im Falle der Luft violette Licht das positive Licht, oder die positive Entladung.

Die brillante Helligkeit und Farbenpracht, die das positive Licht in Geißlerröhren zeigt, ist Veranlassung, daß man diese vielfach benutzt, um schöne glänzende Farbeneffekte hervorzubringen. So macht man für Ballettvorstellungen Diademe aus Glasröhren wie Fig. 287, die mit verschiedenen Gasen gefüllt sind, und die als Geißlerröhren wirken.

Fig. 287.

Die Geißlerröhren enthalten, wie gesagt, Luft oder andere Gase in einer solchen Verdünnung, daß sie ungefähr 1—3 mm Druck zeigen. Geht man nun mit der Evakuation solcher Röhren weiter, so verlieren die Erscheinungen zunächst an Brillanz. Die erste Folge des Weiterpumpens ist nämlich, daß der dunkle Raum zwischen der Kathode und dem positiven Licht an Ausdehnung fortwährend zunimmt. Man kann beim Pumpen direkt verfolgen, wie dieser dunkle Zwischenraum, der zuerst kaum 1 mm lang war, sich rapid vergrößert, auf 10, 20, 50 mm wächst, wenn man die Evakuation bis auf Bruchteile eines Millimeters Druck fortsetzt. Die Röhre wird also in der Nähe der Kathode allmählich immer weiter dunkel, während an der Anode das positive Licht noch vorhanden ist, aber sich immer weniger weit von ihr aus in das Rohr hinein erstreckt und auch nicht mehr geschichtet ist. Durch fort-

gesetztes Evakuieren kann man schließlich erreichen, daß der dunkle Kathodenraum die Röhre ganz ausfüllt, bis nahe an die Anode, daß also das positive farbige Licht bis auf einen kleinen Rest ganz verschwunden ist. Aber gleichzeitig mit dieser wachsenden Ausdehnung des dunklen Raumes geht eine andere Erscheinung vor sich, die zum ersten Male von Hittorf 1869 beobachtet wurde.

Von der negativen Elektrode, der Kathode aus, fangen nämlich bei diesen großen Verdünnungen an Strahlen auszugehen, welche das Glas der Röhre da, wo sie es treffen, zum hellen Leuchten (Phosphoreszieren) anregen. Die Gläser, welche in Deutschland zu diesen Röhren genommen werden, leuchten immer grün, andere (englische) Gläser leuchten blau. Man bekommt also die merkwürdige Erscheinung, daß zwar das Innere der Röhre bei fortgesetzter Evakuation allmählich ganz lichtlos wird, daß dagegen das Glas der Röhre selbst hellgrün phosphoresziert. Die hellste Phosphoreszenz zeigt sich gerade an derjenigen Stelle des Glases, welche der Kathode gegenüberliegt. Macht man durch Umkehrung des Stromes die andere Elektrode zur Kathode, so wird die dieser gegenüberliegende Glasstelle am lebhaftesten zur Phosphoreszenz erregt. Diese Erscheinung läßt sich am leichtesten so auffassen, als ob eben von der Kathode aus Strahlen ausgehen, die, wo sie auf das Glas fallen, dieses zur Phosphoreszenz bringen, die aber selbst im Innern der Röhre nicht sichtbar sind. Diese Strahlen bezeichnet man als Kathodenstrahlen. Nachdem Hittorf sie entdeckt hatte, erregten sie lange keine besondere Beachtung, bis Crookes 1879 die Aufmerksamkeit von neuem auf sie lenkte und durch die Herstellung von zweckmäßig geformten und genügend evakuierten Röhren, die man nach ihm Crookessche Röhren nennt, die Versuche mit Kathodenstrahlen wesentlich erleichterte. In den Crookesschen Röhren ist die Luft sehr weit evakuiert, ungefähr bis auf $^1/_{1000}$ mm Druck, während, wie gesagt, die Geißlerröhren einen Druck von ungefähr 1 mm besitzen.

Fig. 288.

Die Kathodenstrahlen besitzen nun eine Reihe sehr merkwürdiger Eigenschaften. Zunächst nämlich gehen sie immer senkrecht zur Kathode fort, ganz unabhängig davon, wo die Anode sich befindet. Sie kümmern sich um die Anode gar nicht. Man kann die Anode der Kathode gegenüberstellen, oder sie seitlich von ihr lassen, oder sie hinter die Kathode stellen, oder sie als Ring die Kathode umgeben lassen, immer gehen die Kathodenstrahlen unabhängig davon denselben Weg, nämlich senkrecht zur Kathode fort. Da also von jedem Flächenstück auf der Kathode die Strahlen senkrecht fortgehen, so ist es möglich, die Kathodenstrahlen in einem Brennpunkt zu konzentrieren. Wird nämlich als Kathode nicht eine ebene Metallscheibe genommen, sondern ein hohlspiegelförmiges Metallstück wie bei K in Fig. 288, so müssen die Strahlen von ihr aus sich in einem Brennpunkt vereinigen und dann auseinandergehen. Es ist nun ganz gleichgültig, ob der positive Strom bei a, oder bei a′, oder bei a″ in die Röhre eintritt,

immer sieht man die Glaswand an der der Kathode gegenüberliegenden Stelle S am hellsten phosphoreszieren.

Der schärfste Beweis dafür, daß die Kathodenstrahlen sich ganz geradlinig ausbreiten, ist von Crookes durch einen Apparat, wie Fig. 289, geliefert worden. Dieser Apparat zeigt nämlich, daß wenn man einen undurchsichtigen Körper in den Weg der Kathodenstrahlen stellt, daß dieser dann einen scharfen Schatten wirft. In der Röhre ist bei b ein Metallkreuz befestigt. Bei a ist die Kathode, bei P die Anode. Die Kathodenstrahlen, die von a ausgehen, erregen die gegenüberliegende Wand zu heller Phosphoreszenz, überall wo sie sie treffen. Wo aber die Kathodenstrahlen durch das Kreuz abgefangen sind, bleibt die Glaswand dunkel. Man sieht daher ein dunkles Kreuz d auf grünem Grunde an der Glaswand.

Fig. 289.

Eine zweite Eigenschaft der Kathodenstrahlen besteht darin, daß sie nicht bloß das Glas der Röhre, sondern überhaupt jeden (unmetallischen) Körper, auf den sie treffen, zur Phosphoreszenz bringen. Es werden, um dieses zu zeigen, nach dem Vorgang von Crookes vielfach Röhren verfertigt, in deren Innerem verschiedene Mineralien so eingeschlossen sind, daß sie von den Kathodenstrahlen getroffen werden. So zeigt Fig. 290 eine Crookessche Röhre, in welcher in der Mitte bei c ein Mineral, sagen wir ein Stück Tropfstein, befestigt ist. Die Kathodenstrahlen, die von der Kathode oben ausgehen, bringen den Stein zu heller blaurosa Phosphoreszenz. Die Phosphoreszenzfarbe hängt allein ab von der Natur des bestrahlten Körpers; manche Körper leuchten blau, andere rot, violett, grün, und man erhält auf diese Weise prachtvolle glänzende Farbenerscheinungen. Photographische Platten, die den Kathodenstrahlen ausgesetzt werden (im Innern der Röhre), werden geschwärzt, und zwar in fast unmeßbar kurzer Zeit. Legt man auf die Platte etwa Metallbuchstaben, durch die die Kathodenstrahlen abgefangen werden, so bekommt man ein Bild dieser Buchstaben auf der Platte (im Negativ helle Buchstaben auf schwarzem Grund, im Positiv umgekehrt).

Fig. 290.

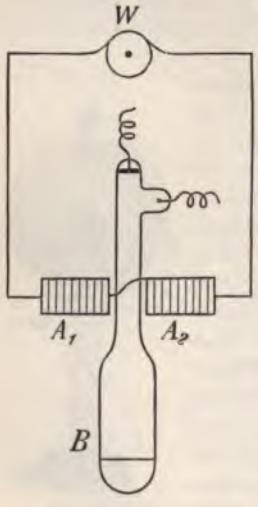
Die Kathodenstrahlen, das ist eine dritte Eigenschaft derselben, erhitzen die Stellen, auf welche sie auftreffen, im allgemeinen sehr stark. So wird das Glas der Crookesschen Röhren an den Stellen, wo es getroffen wird, rasch warm und kann so heiß werden, daß es erweicht und vom

Luftdruck durchbrochen wird. Metallbleche, die im Innern der Röhre den Kathodenstrahlen ausgesetzt werden, fangen an, rot zu glühen, bei stärkerem Strom werden sie sogar weißglühend und schmelzen endlich fort.

Eine vierte Eigenschaft der Kathodenstrahlen, eine der merkwürdigsten, ist ebenfalls, wie die bisherigen, schon von Hittorf gefunden. Die Kathodenstrahlen werden durch den Magneten sehr leicht abgelenkt. Bringt man in die Nähe einer von Kathodenstrahlen erfüllten Röhre einen Magneten, so kann man die Strahlen ablenken, wohin man will. Man sieht, wenn man den Magneten hin und her bewegt, die Phosphoreszenz des Glases bald an der einen Stelle, bald an einer anderen Stelle aufleuchten und mit der Bewegung des Magneten selbst wandern. Auch durch elektrostatische Einflüsse werden die Kathodenstrahlen abgelenkt. Fährt man an der Glaswand der Röhre bloß mit dem Finger hin und her, so sieht man die Phosphoreszenzerscheinung ebenfalls wandern. Der Finger hat dabei offenbar nur die Bedeutung, daß er die statischen Ladungen der Röhre beeinflußt. Da ein Kathodenstrahl keine merkliche Masse besitzt, so folgt er den magnetischen Kräften, die auf ihn wirken, sofort, ohne Verzögerung. Dies hat Braun benutzt, um eine Röhre zu konstruieren, mit welcher man irgendwelche Änderungen von magnetischen Kräften sehr einfach sichtbar machen kann. Diese Braunsche Röhre ist in Fig. 291 dargestellt. Von der Kathode K gehen die Kathodenstrahlen geradlinig aus (A ist die Anode). Durch den Metallschirm S, der ein kleines Loch enthält, werden aber alle aufgehalten und nur ein schmales Bündel fällt durch das Loch auf den phosphoreszierenden Schirm P, der am Ende der Röhre angebracht ist, und erzeugt auf dieser einen blauleuchtenden kreisförmigen Fleck. Bringt man in die Nähe von S einen Magnetstab, so verschiebt sich der Fleck, je nach der Stellung und der Art des genäherten Magnetpols, nach rechts oder links, oben oder unten. Bringt man daher in die Nähe von S einen Stab aus weichem Eisen, um den man Wechselströme herumsendet, so bewegt sich der Fleck in derselben Periode, die der Wechselstrom besitzt, nach der einen und der anderen Seite. Die Art der Anordnung dieser Röhre zur Untersuchung von Wechselströmen und von elektrischen Schwingungen geht aus Fig. 292 hervor. Die Röhre B befindet sich zwischen zwei Spulen A_1 A_2, welche mit Eisenkernen versehen sind (bei starken Strömen können die Eisenkerne fortbleiben). Durch eine Wechsel-

Fig. 291.

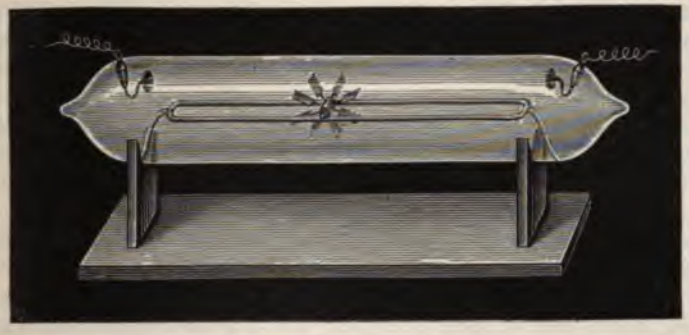
Fig. 292.



stromquelle W werden Wechselströme in dem Kreis erzeugt, welche nun den Lichtfleck der Rohre hin und her ablenken. In einem rotierenden Spiegel, in dem das Bild des Flecks beobachtet wird, sieht man eine blauleuchtende Kurve, welche die Form des Wechselstromes darstellt.

Endlich eine fünfte Eigenschaft der Kathodenstrahlen wurde nicht von Hittorf, sondern erst von Crookes entdeckt. Diese Strahlen üben nämlich mechanische Wirkungen auf leicht bewegliche Körper aus. In einer Röhre, wie Fig. 293, ist ein leicht bewegliches Flügelrad auf zwei Glasschienen verschiebbar angebracht. Läßt man die Entladung durch die Röhre gehen, so treffen die Kathodenstrahlen oben auf die Flügel, drehen diese und treiben das Rädchen auf der Bahn fort. Bei

Fig. 293.



Umkehrung des Stromes kehrt sich auch die Bewegung des Rädchens um, falls beide Elektroden symmetrisch angebracht sind, wie in der Figur.

Lange Zeit schienen die Kathodenstrahlen, so wunderbare Eigenschaften sie auch besitzen, doch kaum mehr als ein Kuriosum zu sein. Sie schienen in die hoch evakuierte Röhre eingeschlossen sein zu müssen und es schien nichts von ihnen nach außen zu dringen. In der Röhre selbst werden die Strahlen schon durch dünne Schichten von Körpern aufgehalten. Eine dünne Glasplatte, in ihren Weg gestellt, phosphoreszierte auf der getroffenen Seite, ließ aber nichts von den Strahlen hindurch. So ließ auch die Glaswand der Röhre nichts von den Kathodenstrahlen nach außen dringen. Sie phosphoreszierte inwendig, und die ganze Energie der Kathodenstrahlen schien zur Erzeugung dieser Phosphoreszenz und zur Erhitzung der Glaswand verbraucht zu werden. Es wurde nun aber durch eine Beobachtung von Hertz, der in diesem Gebiet wie in so vielen anderen befruchtend gewirkt hat, gezeigt, daß durch äußerst dünne Schichten von Aluminium die Kathodenstrahlen hindurchgehen, und auf Grund dieser Beobachtung gelang es Lenard, indem er in die Glaswand ein kleines Stück von Aluminiumfolie einsetzte, die Kathodenstrahlen aus der Röhre hinaus in die Atmosphäre treten zu lassen. Es ergab sich die neue Tatsache, daß die Kathodenstrahlen auch in dichter Luft bestehen können, während sie nur in sehr verdünnter Luft entstehen können. Lenard zeigte weiter, daß die Kathodenstrahlen auch außerhalb der Röhre Körper zum Fluoreszieren erregen und photogra-

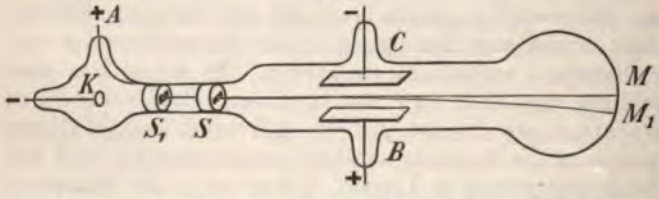
phische Platten belichten können. Er hatte schon bei seinen Kathodenstrahlen die wesentlichsten Eigenschaften beobachtet, die später bei den Röntgenstrahlen großes Aufsehen erregten. Die Versuche von Lenard zeigten auch unter anderem deutlich, was schon vorher von Hertz ausgesprochen war, daß es in einer Röhre Kathodenstrahlen verschiedener Art gibt, die von dem Magneten verschieden stark abgelenkt werden, vergleichbar mit den Lichtstrahlen verschiedener Farbe, die von einem Prisma verschieden stark gebrochen werden.

Eine wichtige neue Tatsache, die sechste Eigenschaft dieser Strahlen, ließ sich einwandfrei feststellen, als man die Kathodenstrahlen aus der Crookesschen Röhre herausbringen konnte. Jeder Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, wird negativ elektrisch. Die Strahlen verhalten sich so, als ob sie negative Elektrizität mit sich führen.

Gerade die letzterwähnte Eigenschaft der Kathodenstrahlen führte auf eine Vorstellung über ihre Natur, die eine Modifikation einer Idee ist, welche schon Crookes ausgesprochen hatte. Crookes meinte, daß diese Strahlen darin beständen, daß von der Kathode aus kleine Teilchen fortgeschleudert würden, entweder die Teilchen der noch vorhandenen Gase oder Teilchen der Kathode selbst, oder vielleicht auch elektrolytische Bestandteile der Gasmoleküle. Dieser Ansicht, die der Emissionstheorie des Lichtes entspricht, wurde die andere entgegengestellt, daß die Kathodenstrahlen eine Wellenbewegung sind, von der Art der Lichtwellen. Indes für diese letztere Ansicht ließ sich kein Beweis erbringen, auch war es nicht möglich, die Eigenschaften der Kathodenstrahlen durch sie begreiflich zu machen. Daher hat sich die Physik jetzt fast allgemein der Vorstellung von Crookes zugewendet, aber mit einer bedeutungsvollen Änderung.

Man nimmt nämlich jetzt an, daß es negativ geladene kleine Massen sind, die negativen Elektronen selbst, welche sich rasch in der Richtung der Strahlen geradlinig von der Kathode fortbewegen. Durch diese Annahme läßt sich erstens ohne weiteres einsehen, daß jedes Metallblech, jeder Körper, der von den Kathodenstrahlen getroffen wird, negativ elektrisch werden muß. Die Phosphoreszenzerscheinungen ferner lassen sich durch den Anprall der bewegten Teilchen erklären. Durch das Bombardement der Teilchen kommen die getroffenen Moleküle der Glaswand oder der eingeschmolzenen Körper in Erzitterungen und senden dadurch das ihnen eigentümliche Phosphoreszenzlicht aus. Bewegte elektrische Massenteilchen müssen ferner durch elektrostatische Kräfte abgelenkt werden. Läßt man Kathodenstrahlen in der Röhre durch den Zwischenraum zwischen zwei Metallplatten gehen, von denen die eine positiv, die andere negativ geladen ist, so müssen die negativen Teilchen sich

Fig. 294.



zur positiven Platte hinbiegen, vermöge der elektrostatischen Anziehungskräfte, was sie auch tun. In Fig. 294 ist eine Anordnung dazu gezeichnet. Eine Crookessche Röhre enthält bei K die Kathode, bei A die Anode. Die Kathodenstrahlen gehen von K aus durch zwei Schlitze in den Metallschirmen S_1 und S und ein schmales Büschel derselben gelangt in den Raum zwischen den zwei Kondensatorplatten B und C, welche in die Röhre eingeschmolzen sind und von denen C mit dem negativen, B mit dem positiven Pol einer Batterie von Akkumulatoren verbunden ist. Der Strahl, der ohne Erregung des Kondensators nach M fiel, fällt nun nach M_1, wird also abgelenkt. Je größer die lebendige Kraft jedes Massenteilchens, d. h. das halbe Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit ist, um so weniger, je größer die Ladung jedes Massenteilchens ist, um so mehr muß es unter sonst gleichen Umständen abgelenkt werden. Die Größe der Ablenkung hängt also ab einerseits von dem Quadrat der Geschwindigkeit der Massenteilchen, andererseits von dem Verhältnis der Elektrizitätsmenge, der Zahl der Coulomb, die jedes Teilchen mit sich führt, zu der Masse desselben, der Anzahl der Gramme.

Endlich aber repräsentieren elektrisch geladene Massenteilchen, die mit einer gewissen Geschwindigkeit sich fortbewegen, auch einen elektrischen Strom. Denn die Stromstärke ist gleich der pro Zeiteinheit durch jeden Querschnitt hindurchgehenden Elektrizitätsmenge, hängt also hier ab von der Elektrizitätsmenge jedes Teilchens und seiner Geschwindigkeit. Und da ein Strom, wie wir wissen, in einem magnetischen Felde von Kräften angegriffen und bewegt wird, so müssen auch die bewegten Teile in den Kathodenstrahlen von magnetischen Kräften angegriffen werden, womit die magnetische Ablenkbarkeit der Strahlen erklärt ist. Je größer die lebendige Kraft, um so geringer; je größer die Stromstärke, d. h. das Produkt aus Ladung und Geschwindigkeit ist, um so größer muß die Ablenkung sein. Man sieht, daß die magnetische Ablenkung einerseits von der Geschwindigkeit (nicht von deren Quadrat), andererseits wieder von dem Verhältnis der Zahl der Coulomb zu der Zahl der Gramme jedes Teilchens abhängt.

Die Annahme rasch bewegter Teilchen, die negativ geladen sind, erklärt also alle Erscheinungen der Kathodenstrahlen. Ja noch mehr. Wenn man die elektrostatische Ablenkung und die magnetische Ablenkung, die durch bekannte elektrostatische resp. magnetische Kräfte hervorgebracht werden, messend verfolgt, so kann man nach dem Gesagten daraus entnehmen, erstens, welche Geschwindigkeit diese Teilchen haben, und zweitens, wie groß die Zahl der Coulomb ist, die ein solches Teilchen pro Gramm mit sich führt. Solche Messungen sind in der Tat ausgeführt worden und haben zu höchst überraschenden Resultaten geführt. Sie haben erstens ergeben, daß die Geschwindigkeit der Teilchen in den Kathodenstrahlen eine sehr große ist. Sie ist in stärker evakuierten Röhren größer als in weniger evakuierten und erreicht in den ersteren Werte bis zu einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit, eine ganz enorme Geschwindigkeit, die weitaus alles übertrifft, was sonst in der Natur an Geschwindigkeiten bewegter Massen zu finden ist. Zweitens aber ergab sich, daß jedes Gramm dieser Teilchen eine Ladung von etwa 170 Millionen Coulomb besitzen müsse. Da wir nun aus der Elektrolyse wissen, daß ein Gramm

Wasserstoff nur 96000 Coulomb mit sich führt, so folgt daraus, daß die geladenen Teilchen hier bei derselben Ladung eine sehr viel kleinere Masse, etwa den zweitausendsten Teil besitzen müssen als die Atome des Wasserstoffs. Daraus hat man eben den Schluß gezogen, daß in den Kathodenröhren die kleinsten Teilchen der negativen Elektrizität, die negativen Elektronen selbst es sind, welche sich in den Kathodenstrahlen bewegen. Bei der Elektrolyse fanden wir immer, daß die Elektronen mit den Atomen der körperlichen Materie verbunden sind und sich nur mit diesen bewegen. Hier in den sehr verdünnten Gasen können sich aber die Elektronen frei von der Materie bewegen und da sie so sehr kleine Massen besitzen und in der Röhre starke elektrische Kräfte vorhanden sind, so bekommen sie dadurch die erwähnten großen Geschwindigkeiten.

Man muß natürlich fragen, wenn in den Kathodenstrahlen die negativen Elektronen sich bewegen, wo sind dann die positiven Elektronen? Denn da das Gas vor dem Durchgang des Stromes unelektrisch ist, so müssen außer den negativen auch positive Teilchen vorhanden sein. In der Tat bewegen sich in einer solchen evakuierten Röhre auch positiv geladene Teile, aber sie sind viel schwieriger zu beobachten. Am einfachsten kann man sie finden, wenn man die Kathode einer solchen Röhre mit Löchern, Kanälen versieht. Wenn dann ein Strom hindurchgesendet wird und die Kathodenstrahlen von der Kathode nach der einen Seite der Röhre geradlinig ausgehen, so findet man, daß von den Löchern aus nach der anderen Seite der Röhre sich auch schwach leuchtende strahlenartige Gebilde ausbreiten, die man wegen dieser Kanäle Kanalstrahlen nennt. Diese lassen sich durch den Magneten viel schwächer ablenken als die Kathodenstrahlen, aber sie werden gerade nach der entgegengesetzten Richtung abgebogen wie jene, woraus eben folgt, daß sie positive Ladung besitzen. Man hat nach derselben Methode auch ihre Geschwindigkeit und ihre Masse experimentell zu bestimmen vermocht und es hat sich ergeben, daß sie sehr viel geringere Geschwindigkeiten besitzen und daß ihre Masse bei gleicher Ladung ungefähr ebenso groß ist wie die Masse eines Wasserstoffatoms. Während also die negativen Elektronen, wie es scheint, sich frei von Materie für sich bewegen können, scheinen die positiven Elektronen auch hierbei noch immer mit größeren Massen fest verbunden zu sein. Gerade wegen dieser großen Masse, mit der sie belastet sind, ist ihre Geschwindigkeit eine so viel geringere als die der Kathodenstrahlen.

Das Interesse für die Kathodenstrahlen, das durch die oben erwähnten resultatreichen und mühsamen Untersuchungen von Hertz und Lenard bei den Physikern erweckt war, wurde im Anfang des Jahres 1896 allgemein durch eine zufällige Entdeckung, die sofort merkwürdige praktische Anwendungen zeitigte. Es zeigte sich, daß von einer Röhre, in der Kathodenstrahlen vorhanden sind, auch Strahlen geliefert werden, die aus dem Glase heraustreten und weit in die freie Luft gehen können. Von derjenigen Stelle des Glases einer Crookesschen Röhre, welche von den Kathodenstrahlen getroffen und zur Phosphoreszenz erregt wird, gehen nämlich, wie Röntgen fand, Strahlen aus, welche er X-Strahlen nannte, welche man aber jetzt gewöhnlich Röntgenstrahlen nennt. Diese Strahlen geben sich dadurch zu erkennen, daß sie auf photographische Platten,

die außerhalb der Röhre sich befinden, wirken, und ferner auch dadurch, daß sie fluoreszenzfähige Körper zum Leuchten (Fluoreszieren) erregen. Umhüllt man also eine Crookessche Röhre, um alle Wirkungen des sichtbaren Lichtes auszuschließen, mit einem schwarzen Karton oder mit schwarzem Tuch und bringt man in die Nähe der von den Kathodenstrahlen getroffenen Stelle des Glases einen Papierkarton, der mit Baryumplatincyanür bestrichen ist, so findet man, daß dieser hell grünlich aufleuchtet. Bringt man ebenso in die Nähe eine photographische Platte, so wird diese belichtet. Denn wenn man sie in gewöhnlicher Weise entwickelt, so zeigt sie sich vollkommen geschwärzt.

Diese unsichtbaren Strahlen gehen genau von derjenigen Stelle der Crookesschen Röhre aus, welche von den Kathodenstrahlen getroffen ist. Man kann das leicht nachweisen, indem man durch einen Magneten die Kathodenstrahlen im Inneren der Röhre ablenkt und sie auf eine andere Stelle der Glaswand hinlenkt. Dann ist die neue getroffene Stelle die wirksame.

Das Merkwürdigste ist, daß diese Strahlen durch die meisten nicht metallischen Körper leicht hindurchgehen, durch die gewöhnliches Licht nicht hindurchdringt. Insbesondere ist das Holz für diese Strahlen sehr leicht durchlässig. Sie gehen durch Holz ebenso leicht hindurch wie die gewöhnlichen Lichtstrahlen durch Glas. Daraus folgt, daß, wenn man eine photographische Platte durch sie belichten lassen will, man diese Platte ruhig in eine Holzkassette eingeschlossen ihnen exponieren darf. Dadurch hat man sofort ein Kriterium dafür, was durch Röntgenstrahlen und was durch gewöhnliches Licht bewirkt wird. Denn nur die ersteren durchdringen das Holz. Ebenso wie das Holz sind aber auch andere undurchsichtige Körper, Ebonit, Kautschuk, Wachs, Kork, Kohle, Graphit, leicht durchlässig, ja auch Aluminium läßt diese Strahlen ganz ebenso leicht durchgehen wie Glas. Die schweren Metalle sind viel undurchlässiger, aber auch nicht vollständig. Auch durch Eisen, Silber, Gold, Kupfer in dünnen Schichten gehen die Strahlen. Blei ist am allerwenigsten durchlässig. Überhaupt läßt sich ungefähr sagen, daß ein Körper um so leichter den Röntgenstrahlen den Durchgang gestattet, je leichter er spezifisch ist, um so schwerer also, je dichter er ist. Auf die optische Durchlässigkeit kommt es gar nicht an. Aluminium und Glas, die ziemlich gleich dicht sind, haben die gleiche Durchlässigkeit, Holz, namentlich Tannenholz, das viel leichter ist, ist auch viel durchlässiger. Unterschiede in der Dichtigkeit zwischen verschiedenen Körpern geben auch Unterschiede in der Durchlässigkeit. Darauf beruht nun der Versuch, der diesen Strahlen so rasch ihre Popularität verschafft hat. Es gelingt dadurch, aus umhüllten oder verschlossenen Körpern den Inhalt zu photographieren, wenn der Inhalt dichter ist als die Umhüllung. So kann man aus einem verschlossenen Portemonnaie das Geld, aus einem Holzblock etwa darin enthaltene Schrauben, aus der Hand die Knochen photographieren, weil eben die Geldstücke die auftreffenden Strahlen mehr zurückhalten als das Leder, die Schraube mehr als das Holz, die Knochen mehr als das Fleisch.

So zeigt Fig. 295 die Photographie von zwei Metallschrauben, die in zwei verschiedene Holzklötze eingedreht waren. Man sieht mit großer Schärfe die Schrauben, man sieht aber auch die Fasern und die Maserung

des Holzes, welche vermöge ihrer verschiedenen Dichtigkeit auch verschiedene Durchlässigkeit haben.

In Fig. 296 sieht man das vollständige Knochengerüst einer Hand und sieht zugleich am Ringfinger einen Ring, der natürlich am meisten opak ist.

Fig. 295.

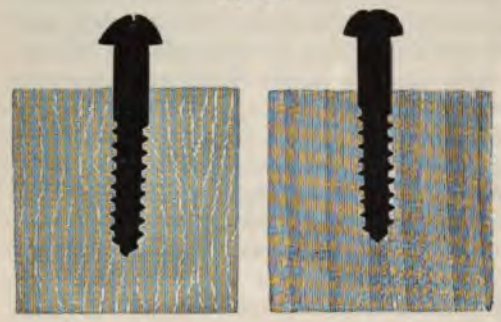


Fig. 297 zeigt, in derselben Weise aufgenommen, ein junges Schwein, von dem man ebenfalls die Knochen alle erkennt; außerdem aber zeigen sich im Inneren helle Flecke, welche inneren weichen Organen entsprechen.

Die frappanteste Eigenschaft der Röntgenstrahlen ist eben diese, daß sie so leicht durch alle möglichen undurchsichtigen Stoffe hindurch sich fortpflanzen. Sie zeigen aber noch weitere Unterschiede von den Lichtstrahlen. Während diese vom Spiegel bekanntlich regelmäßig reflektiert werden, lassen sich die Röntgenstrahlen nicht regelmäßig reflektieren, sondern nur in geringem Maße zerstreut zurückwerfen. Ebenso zeigen sie entgegen den gewöhnlichen Lichtstrahlen auch keine Brechung, wenn sie durch ein Prisma hindurchgesendet werden. Von den Kathodenstrahlen unterscheiden sie sich dadurch, daß sie von einem Magneten nicht abgelenkt werden. Allerdings gibt es auch Kathodenstrahlen, welche keine magnetische Ablenkung erfahren.

Fig. 296.

Man hat sich natürlich gleich nach der Entdeckung dieser Strahlen wegen ihrer so hervorragenden medizinischen Wichtigkeit bemüht, Konstruktionen für die Röhren und die Elektroden zu finden, welche für die photographische Wirkung am zweckmäßigsten sind. Dabei hat sich nun zunächst gezeigt, daß es durchaus nicht am zweckmäßigsten ist, wie es zuerst geschah, die Röhrenwand selbst zum Phosphoreszieren zu bringen und von ihr aus die Strahlen ausgehen zu lassen. Vielmehr hat sich ergeben: Jeder Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, ob er innerhalb der Röhre oder an der Röhrenwand sich befindet, wird zum Ursprung von Röntgenstrahlen. Der Körper kann sichtbar phosphoreszieren, wie es das Glas der Röhrenwand oder eingeschmolzene Mineralien tun, es kann aber auch ein Metall sein, welches nicht leuchtend phosphores-

ziert. Auch Metalle senden die Strahlen aus, wenn sie von den Kathodenstrahlen getroffen werden. Allgemein bezeichnet man jetzt diejenige Stelle, welche von den Kathodenstrahlen getroffen wird und daher Röntgenstrahlen aussendet, als die Antikathode der Röhre.

Um möglichst scharfe photographische oder fluoreszierende Bilder zu erhalten, muß man danach trachten, die Röntgenstrahlen möglichst von einem Punkt ausgehen zu lassen, nicht von einer ganzen Fläche. Denn wenn Strahlen von allen Punkten einer ausgedehnten Fläche ausgehen, so erhält man Bilder, welche verschwommene Grenzen und Schlagschatten besitzen. Die obige Forderung kann man nun einfach dadurch erfüllen, daß man die Kathode der Röhre hohlspiegelartig macht. Wir wissen ja (S. 292), daß die Kathodenstrahlen dann in einem Punkt, dem Brennpunkt des Hohlspiegels, zusammentreffen. Bringt man nun ungefähr an die Stelle dieses Brennpunktes ein Metallblech in das Innere der Röhre, so wird dieses die Antikathode und von ihm gehen dann die Strahlen aus. In dieser Weise werden jetzt fast durchweg die Vakuumröhren konstruiert. Man bezeichnet sie als Fokusröhren. Dieselben besitzen drei Metallbleche im Inneren. Ein hohlspiegelartig geformtes als Kathode, ein anderes ebenes als Anode und ein drittes Metallblech, welches als Antikathode dient und in den Brennpunkt der Kathodenstrahlen gestellt ist. So zeigt Fig. 298 eine Röhre, wie sie für kleine Induktorien vielfach gebraucht wird. Man sieht rechts die hohlspiegelförmige Kathode, oben die Anode und in der Mitte eine Aluminiumplatte, auf welcher ein Platinblech befestigt ist, welches als Antikathode wirkt. Die Antikathode wird zweckmäßig, wie es in der Figur gezeichnet ist, mit der Anode außen durch einen Draht verbunden. Dann ist die Antikathode zugleich Anode und die Röntgenstrahlen gehen von der Anode aus. Die Platinantikathode sendet von der bestrahlten Seite aus die Röntgenstrahlen durch den vor ihr liegenden Teil der Glaskugel, welche dabei schön grün phosphoresziert. Man gibt im allgemeinen der Kugel, in welcher die Antikathode sich befindet, ein recht großes Volumen, weil dann die Röhren haltbarer sind.

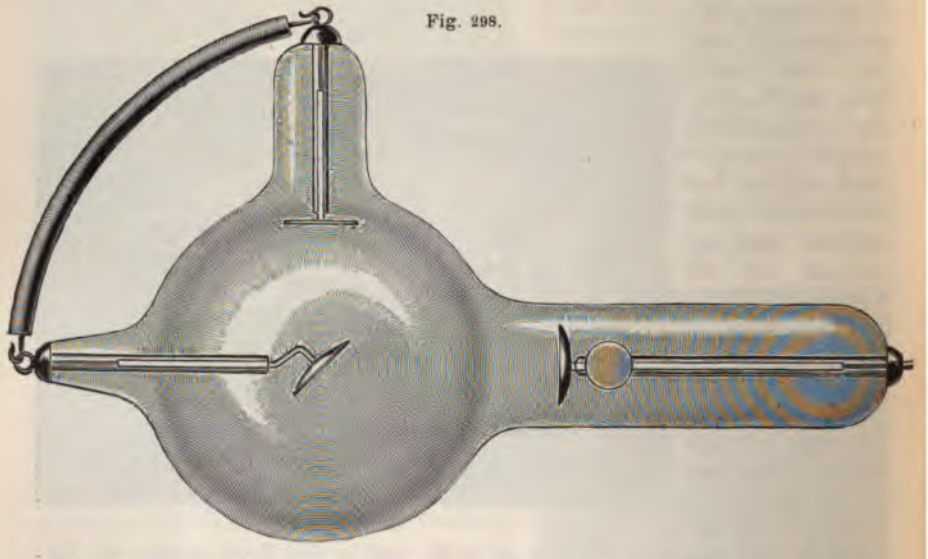
Fig 297.

Die Verdünnung der Luft in den Röhren ist allmählich immer weiter getrieben worden. Genau läßt sich der Grad der Luftverdünnung nicht angeben, er ist vielmehr nur aus der Schlagweite einer parallel zur Röhre

geschalteten Funkenstrecke zu schätzen. Während anfangs Schlagweiten von 15 bis 30 mm benutzt wurden, evakuiert man jetzt so stark, daß Schlagweiten von 50 bis 100 mm nötig sind, um die Entladung durch die Röhre gehen zu lassen.

Je nach dem Vakuum, welches eine Röhre besitzt, sind die Röntgenstrahlen, welche sie aussendet, von verschiedener Art. Eine Röhre mit verhältnismäßig geringem Vakuum sendet Strahlen aus, welche von dichten Körpern leicht absorbiert werden. Eine solche Röhre bezeichnet man als weiche Röhre. Geringe Unterschiede in der Dichtigkeit von durchstrahlten Körpern bringen bei ihnen schon merkliche Verschiedenheiten in der Durchlässigkeit für die Strahlen hervor. Daher geben solche Röhren auf der photographischen Platte kontrastreiche Bilder. Aber dicke Schichten von Körpern lassen sich durch

Fig. 298.



solche Röhren nicht photographieren, weil eben die Strahlen nicht durchgelassen werden. Im Gegensatz dazu nennt man Röhren, in denen das Vakuum sehr hoch ist, harte Röhren. Die Strahlen, die von diesen ausgehen, werden wenig absorbiert, sie dringen auch durch dicke Schichten von Körpern hindurch, aber gerade wegen dieser geringen Absorption geben sie keine kontrastreichen Bilder. Sie werden z. B. durch die Knochen fast ebenso leicht hindurchgelassen wie durch das Fleisch und man erhält daher mit ihnen keine deutliche Knochenphotographie.

Bei allen Röntgenröhren tritt aber ein Umstand sehr störend auf. Die Röhren werden mit dem Gebrauch allmählich von selbst immer luftleerer, das Vakuum in der Röhre verändert sich beim Gebrauch selbst in dem Sinne, daß die Röhre von selbst luftleerer, also härter wird. Der Grund davon ist der, daß die geladenen Gasteilchen im Innern sich an den Glaswänden festsetzen. Daraus ergeben sich aber auch sofort einige Mittel, wie man solchen zu hart oder vielleicht ganz unbrauchbar gewordenen

Röhren wieder aufhelfen kann. Man muß danach trachten, die anhaftenden Gasschichten wieder frei zu machen. Das gelingt dadurch, daß man das Glas der Röhre erwärmt, namentlich in der Nähe der Kathode. Dann funktionieren solche schon unbrauchbar gewordene Röhren wieder eine Zeitlang recht gut. Wirksamer ist das Mittel, das Ansatzrohr, welches die Kathode enthält, mit angefeuchtetem Papier oder angefeuchteter Leinwand zu umhüllen, und zwar der ganzen Länge nach, von der Einschmelzstelle der Elektrode an bis an die Glaskugel. Dadurch nämlich wird die statische Elektrizität des Glases abgeleitet und die Gasteilchen sind wieder frei beweglich. Der umgekehrte Fehler, daß der Druck des Gases in einem Rohr zu groß ist, bewirkt ebenfalls, daß die Röhren schlechte Wirkung zeigen. Die Röhre ist dann zu weich. Den Fehler der zu großen Weichheit kann man gewöhnlich leicht dadurch beseitigen, daß man die Entladung eine Zeitlang in umgekehrter Richtung durch die Röhre hindurchgehen läßt, so daß die Platinantikathode zur Kathode wird. Dann zerstäubt nämlich das Platin und ein Teil des in der Röhre enthaltenen Gases wird von den Platinteilchen absorbiert, so daß die Röhre wieder härter wird. Diese Zerstäubung der Antikathode tritt übrigens bei den Röhren, auch bei richtiger Benützung, ein, wenn die Kathodenstrahlen so stark werden, daß sie die Antikathode stark erhitzen. Namentlich bei der Anwendung der neuen Unterbrecher, des Wehneltschen und des Turbinenunterbrechers, sind die Energiemengen, die in die Röhre hineingesendet werden, so große, daß die Antikathode rasch ins Glühen kommt. Man tritt dem entgegen, indem man entweder den Metallstab, welcher die Antikathode trägt, sehr dick macht, damit die Erwärmung geringer wird, oder bei sehr starker Beanspruchung der Röhre, indem man die Antikathode so einrichtet, daß man sie durch fließendes Wasser oder Öl kühlen kann.

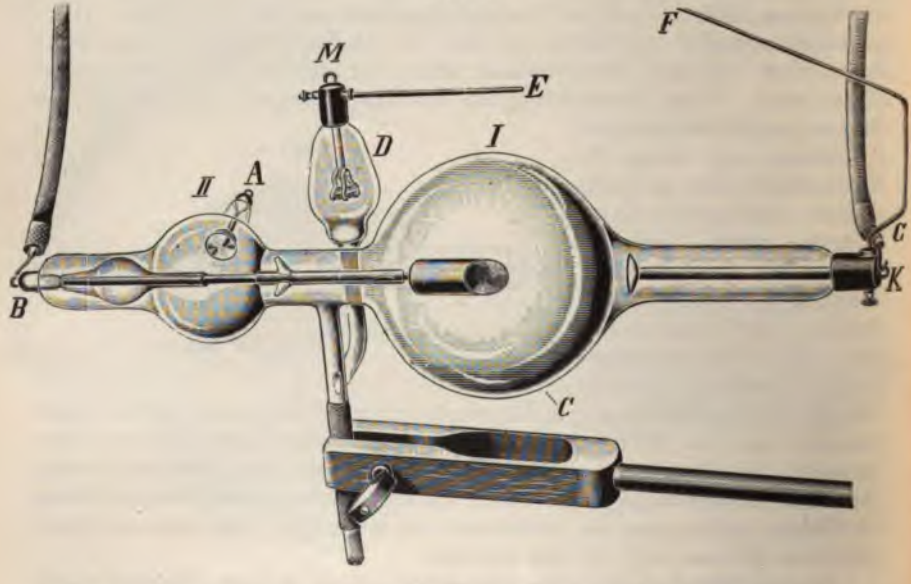
Fig. 299.

Bessere Mittel als die oben angegebenen, um zu harte Röhren wieder weicher zu machen, sind von verschiedenen Seiten angegeben worden und es werden sogar Röhren konstruiert, welche gestatten, die Verdünnung innerhalb gewisser Grenzen zu r e g u l i e r e n, so daß man sie auf den jedesmal gewünschten Grad der Verdünnung einstellen kann. Eine solche Röhre ist z. B. die von Siemens & Halske konstruierte und in Fig. 299 dargestellte. Die Regulierung des Vakuums beruht hierbei darauf, daß Palladium bei Rotglut Wasserstoff durch sich hindurchdiffundieren läßt. Es ist deshalb in die Röhre (die eine verstärkte Antikathode A besitzt, um große Energiemengen ohne schädliche Erhitzung aufzunehmen) ein Palladiumröhrchen P eingeschmolzen, welches für gewöhnlich durch eine Kappe geschützt ist. Ist die Röhre zu hart geworden, so erhitzt man das Palladiumröhrchen durch eine Spiritusflamme, wodurch Wasserstoff in das Innere der Kugel dringt und die Röhre weicher macht.

Eine andere Art der Regulierung ist bei der in Fig. 300 dargestellten

Voltohmröhre benutzt, welche von der Elektrizitätsgesellschaft Polyphos in München konstruiert wird. Die Voltohmröhren mit und ohne Regulierung haben alle die in der Figur gezeichnete Form und zeichnen sich durch besonders vortreffliche Wirkung aus. K ist die Kathode, B die Antikathode, die hier durch einen starken Eisenzylinder verstärkt ist, um große Energieen vertragen zu können. Für gewöhnlich benutzt man B zugleich als Anode, man kann aber auch A zur Anode machen. Um das Vakuum der Röhre regulieren zu können, ist an die Röhre noch ein besonderes Gefäß D angeschmolzen, welches mit der Röhre selbst zusammen ausgepumpt ist. Dieses enthält nun eine kleine Hilfskathode (die an M befestigt ist) und dieser gegenübergestellt eine Hilfsantikathode, ein Metallblech, welches mit Substanzen bestrichen ist, die

Fig. 300.



beim Erhitzen Luft abgeben. An K sowohl wie an M sind Metallstangen befestigt, deren Enden E und F in beliebigen Abstand gebracht werden können. Wird nun das Vakuum der Röhre zu groß, so daß die Entladung nicht mehr durch die Röhre geht, so springen Funken zwischen F und E über und die Hilfskathode in D sendet nun Kathodenstrahlen auf ihre Hilfsantikathode, die dadurch erwärmt wird und Luft abgibt. Dadurch wird aber das Vakuum der Röhre geringer, die Röhre wird wieder weicher und man hat es in der Hand, durch kürzeren oder längeren Gebrauch der Hilfskathode die Röhre auf jeden beliebigen Grad der Weichheit zu bringen. Durch umgekehrtes Einschalten des Stromes kann man sie dann auch wieder beliebig härter machen. So kann man die Luftverdünnung in der Röhre regeln.

Die Anstellung der photographischen Versuche mit einer Röntgenröhre ist nun sehr einfach. Will man z. B. eine Knochenphotographie

der Hand haben, so wird die Röntgenröhre, wie Fig. 301 zeigt, in einem Stativ so befestigt, daß von der Antikathode A die Röntgenstrahlen nach unten geworfen werden. Ein Induktionsapparat J wird mit seinen Polen i i mit der Kathode K und Anode A der Röhre verbunden. Auf den Tisch, unterhalb der Röhre, wird eine photographische Platte, in schwarzes Papier C gehüllt, gelegt (sie kann auch in eine Holzkassette gelegt werden), mit der Schichtseite nach oben, und direkt auf das umhüllende Papier wird die zu photographierende Hand gelegt. Setzt man den Induktionsapparat in Tätigkeit, so wird die Platte von den Röntgenstrahlen bestrahlt und zwar an den durchlässigen Teilen der Hand, den Muskeln, stärker als an den weniger durchlässigen Knochen und dem Ring. Entwickelt man dann die Platte im gewöhnlichen roten Licht mit gewöhnlichem

Fig. 301.

Entwickler (Amidol, Hydrochinon etc.), so sieht man die Knochen hell auf dunklem Grunde erscheinen. Die Dauer der Exposition richtet sich nach der Güte der Röhre und der Stärke des angewandten Funkeninduktors. Während man im Anfang 5 bis 10 Minuten für eine Knochenphotographie der Hand brauchte, kann man jetzt, mit den verbesserten Röhren und den verbesserten Unterbrechern, schon in Bruchteilen einer Sekunde eine solche erzielen. Wenn man die neueren Unterbrecher, den Turbinenunterbrecher oder den elektrolytischen anwendet, so kann man schon in einer Sekunde eine Photographie des Brustkorbes, in 10 Sekunden eine solche des Beckens hervorbringen.

Die intensiv wirkenden Röntgenstrahlen, die man durch die jetzt konstruierten Röhren erhält, lassen sich aber, außer zur Herstellung

von Photographieen, ganz besonders zu direkter Durchleuchtung namentlich des Körpers verwenden. Dies geschieht durch Benutzung der Eigenschaft, daß diese Strahlen Fluoreszenz erregen. Es werden sogenannte Fluoreszenzschirme von den Fabrikanten hergestellt, welche zu diesem Zwecke dienen. Diese bestehen aus einem schwarzen Karton, der mit einer ziemlich dicken Schicht von feingepulvertem Baryumplatincyanür und einem Bindemittel auf der einen Seite bestrichen ist. Läßt man auf einen solchen Schirm von der Rückseite, also durch den Karton hindurch, Röntgenstrahlen fallen, so leuchtet diese Schicht im Dunkeln sehr hell weiß mit einem Stich ins Grüne. Bringt man nun zwischen die Röhre und den Schirm etwa die Hand, so werden die Strahlen vom Fleisch leicht durchgelassen, von den Knochen aber weniger, und man sieht daher auf dem Schirm ein Schattenbild der Hand mit den Knochen, nämlich die Knochen dunkel auf hellerem Grunde. Und so kann man nicht bloß die Knochen der Hand, des Unter- und Oberarms, sondern auch die des Fußes, des Unterschenkels und Oberschenkels, ferner die Rippen des Brustkastens und die Schädelknochen deutlich sehen. Aber außer den Knochen sieht man auch innere weiche Organe, die Lungen, das Herz, das Zwerchfell, den Magen, direkt auf dem fluoreszierenden Schirm. Ja man kann sogar die Bewegung des Zwerchfells beim Atmen und die Bewegung des Herzens bei seiner fortwährenden Tätigkeit direkt mit bloßem Auge dabei verfolgen.

Fig. 302.

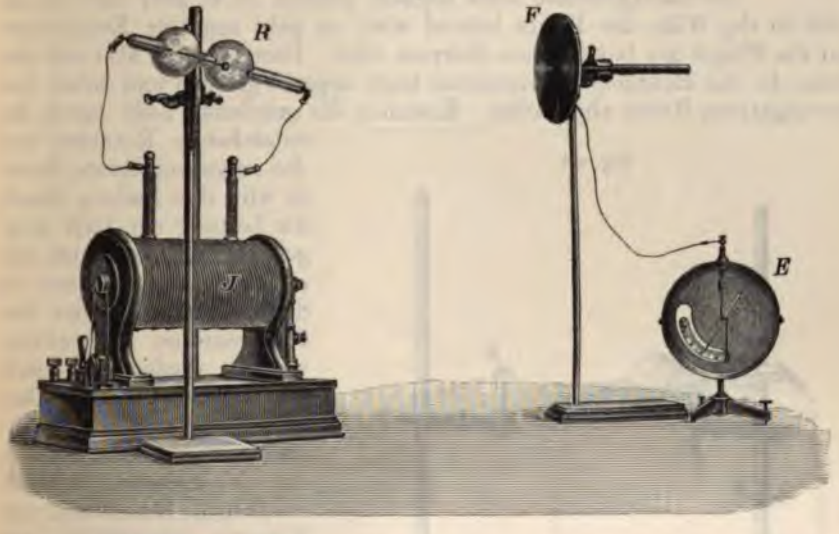
Für diese Fluoreszenzbeobachtungen muß zunächst das Zimmer, in dem beobachtet wird, vollständig dunkel sein. Denn die Helligkeit des Fluoreszenzlichtes, obwohl sie im Dunkeln sehr bedeutend erscheint, wird doch schon durch gewöhnliches Lampenlicht überstrahlt. Indes kann man natürlich auch eine Verdunkelung des Zimmers vermeiden, wenn man nur dafür sorgt, daß auf das Auge des Beobachters kein anderes Licht fällt, als eben das des fluoreszierenden Schirmes. Zu diesem Zweck benutzt man, wie Fig. 302 zeigt, einen Apparat, den man Kryptoskop genannt hat. Der fluoreszierende Schirm bildet nämlich, mit der Schichtseite nach innen, den Boden eines lichtdicht verschlossenen Kastens. In die Öffnung oben, die aus weichem, sich anschmiegendem Stoff gebildet ist, steckt der Beobachter seinen Kopf, und nun kann er, da durch den Boden gewöhnliches Licht nicht hindurchgeht, sondern nur die Röntgenstrahlen, direkt die Bilder auf dem Schirm beobachten.

Die Erfolge, die mit dieser Methode in der Medizin täglich erzielt werden, namentlich zur Auffindung von Fremdkörpern, Nadeln, Metallsplittern im Körper, aber auch zur Untersuchung der Größe des Herzens u. s. w., sind ja bekannt genug. Allerdings sind diese Strahlen in manchen Fällen für den menschlichen Körper nicht ungefährlich, ja bei gewissen Personen haben sie sehr schwere Krankheiten hervorgebracht, so daß in

mancher Beziehung eine gewisse Ernüchterung der früheren Begeisterung Platz gemacht hat und jedenfalls die Röntgenstrahlen am menschlichen Körper nur mit Vorsicht gebraucht werden dürfen.

Eine Eigenschaft der Röntgenstrahlen wurde im obigen noch gar nicht berührt, und gerade diese ist physikalisch von hohem Interesse. Diese Eigenschaft besteht darin, daß die Röntgenstrahlen elektrisch geladene Körper, auf die sie fallen, sehr rasch entladen. Um dieses zu zeigen, bringt man etwa, wie in Fig. 303, eine Metallplatte F, die an einem Glasstab befestigt ist, in ein Stativ und verbindet sie durch einen Draht mit einem Elektroskop, etwa dem auf S. 18 beschriebenen. Auch das Elektroskop muß isoliert aufgestellt sein. Wenn man nun mit einer geriebenen Ebonitstange die Metallplatte negativ elektrisiert, so schlägt die Nadel des Elektroskops aus und bleibt abgelenkt, weil ja die umgebende Luft

Fig. 303.



ein Isolator ist. Sowie man aber in der gegenübergestellten Röhre R (einer Voltohmröhre α) die Röntgenstrahlen erzeugt, geht der Zeiger des Elektroskops fast momentan zurück, ein Beweis, daß die geladene Platte dadurch entladen wurde. Macht man denselben Versuch, nur mit dem Unterschiede, daß man die Platte nicht negativ, sondern durch einen geriebenen Glasstab positiv lädt, so findet dasselbe statt. Auch die positive Ladung verschwindet durch das Auftreffen der Röntgenstrahlen. Am einfachsten läßt sich dieser Versuch so deuten — und diese Deutung wird durch besondere zu ihrer Prüfung angestellte Versuche bestätigt —, daß die Luft, die von den Röntgenstrahlen durchstrahlt ist, ihr Isolationsvermögen verloren hat und selbst leitend geworden ist. Wenn die Luft leitend geworden ist, so kann natürlich eine Ladung auf einem Körper nicht bestehen bleiben, sondern sie muß abgeleitet werden auf die Umgebung und schließlich auf die Erde, so daß dadurch der geladene Körper zur Erde abgeleitet ist. Natürlich wird die durchstrahlte Luft nicht etwa

ein so guter Leiter wie Kupfer oder auch nur wie eine Salzlösung, die Leitungsfähigkeit ist noch außerordentlich gering, aber sie genügt doch, um die geladenen Körper, die Spannungen von einigen hundert oder tausend Volt gegen die Erde haben, sehr rasch zu entladen.

Diese elektrische Wirkung kann unter anderem dazu dienen, auch durch die Röntgenstrahlen solche mechanische Bewegungen hervorzubringen, wie sie oben bei den Kathodenstrahlen beschrieben wurden. Man muß dazu leichte isolierende Körper nehmen, z. B. wie ein Fig. 304 zwei Scheiben aus Paraffin, die durch ein Querstück verbunden sind und mittels eines Achathütchens auf einer Nähnadelspitze aufsitzen. Stellt man, wie in Fig. 305, einen solchen leicht beweglichen Körper F in der Nähe einer Röntgenröhre R auf, so kommt er in lebhafte Rotation, sobald man die Röntgenstrahlen erzeugt. Es ist nämlich die Glasfläche der Röntgenröhre stets negativ geladen (o. S. 296) und da die Luft in der Nähe der Röhre leitend wird, so geht negative Elektrizität auf die Flügel des beweglichen Körpers über. Diese werden also auf der Seite, die der Röntgenröhre zunächst liegt, negativ geladen und daher von der negativen Röhre abgestoßen. Kommen die geladenen Teile durch die entstehende Rotation auf die entgegengesetzte Seite, so wird ihre Ladung durch die Leitung der Luft weggeführt und sie werden unelektrisch und kommen in diesem Zustand wieder der Röntgenröhre gegenüber, werden wieder elektrisch und abgestoßen und daher geht die Rotation fortwährend weiter. Auch innerhalb der Crookesschen Röhren beruhen die Rotationen von Körpern vermutlich auf demselben Mechanismus.

Fig. 304.

Fig. 305.

Die Tatsache, daß die Luft, wenn sie von solchen Strahlen durchzogen wird, leitend wird, erklärt man sich so, daß man annimmt, die Luftteilchen würden zum Teil durch die Strahlen auseinandergerissen, so daß dadurch freie, positiv und negativ geladene Teilchen existieren. Man sagt deswegen auch, die Luft werde durch diese Strahlen ionisiert. Die freien Ionen in der Nähe eines geladenen Körpers können sich dann mit der auf ihm vorhandenen Elektrizität verbinden und so die Entladung bewirken.

Über die Natur der Röntgenstrahlen ist man heute noch nicht sicher aufgeklärt. Es ist ihrem Entdecker nur gelungen, ihre frappanten Eigenschaften festzustellen; aber welcher Art diese Strahlen sind, ob sie wie die Lichtstrahlen auf einer Wellenbewegung, oder wie die Kathodenstrahlen auf einer Massenbewegung beruhen, oder ob sie von noch anderer Art sind, darüber hat er keine Entscheidung beizubringen vermocht. Die einzige Hypothese, die er aufstellte, hat sich nicht bestätigen lassen. Man nimmt jetzt an, daß in der Röhre durch den Anprall der Elektronen an die Antikathode der Äther fortwährenden Stößen ausgesetzt ist und daß diese Stöße, die sich durch den Äther fortpflanzen, die Wirkungen der Röntgenstrahlen erzeugen. Doch ist das bisher nur eine plausible Annahme. So wichtig daher auch die praktische Bedeutung dieser Strahlen ist, ihre wissenschaftliche Erklärung ist noch eine Aufgabe für weitere Forschungen.

13. Kapitel.

Die Becquerelstrahlen und die Radioaktivität.

Welche ungeahnte Überraschungen die Natur der forschenden Untersuchung zu bieten vermag, das trat selten so klar zu Tage wie bei den Entdeckungen, die die letzten Jahre brachten und welche zeigten, daß eine Erscheinungsform der Elektrizität, die man als Strahlung oder besser Elektronenstrahlung bezeichnen muß, viel allgemeinere Bedeutung hatte, als man früher ahnte.

Eine reiche Ausbeute an strahlenartigen Erscheinungen der Elektrizität boten schon die Crookesschen Röhren. Wir fanden da zunächst die auffallende Erscheinung der Kathodenstrahlen, welche außer der geradlinigen Fortpflanzung die Eigenschaft besitzen, photographische Platten zu belichten, Fluoreszenz und Phosphoreszenz zu erregen und durch sehr dünne Schichten von Körpern, sogar von Metallen hindurchzugehen. Die vollständigste Erklärung für diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen ist, wie wir S. 296 f. ausgeführt haben, die, daß dieselben aus außerordentlich kleinen, negativ geladenen Körperchen, Elektronen, den Atomen der Elektrizität, bestehen, die von der Kathode aus mit sehr großer Geschwindigkeit fortfliegen.

In den Kathodenstrahlen sind die negativen Elektronen, die bei den elektrolytischen Vorgängen immer mit gewöhnlicher Materie fest verbunden vorkommen, frei für sich vorhanden und sie fliegen, vermöge der hohen Spannungen in der Crookesschen Röhre, mit sehr großer Geschwindigkeit von der Kathode fort, einer Geschwindigkeit, die nahezu $^1/_3$ der Lichtgeschwindigkeit ist. Durch diese Auffassung werden insbesondere die Eigenschaften der Kathodenstrahlen erklärt, daß sie erstens jeden Körper, auf den sie treffen, negativ elektrisch laden, und daß sie zweitens, was sehr merkwürdig ist, durch einen Magneten und durch elektrisch geladene Körper aus ihrer Bahn abgelenkt werden. Die Lichtstrahlen laden die Körper nicht, auf die sie treffen, und werden von einem Magneten absolut nicht beeinflußt, so daß hierin ein wesentlicher Unterschied zwischen Kathodenstrahlen und Lichtstrahlen besteht.

Weiter aber fanden wir in den Crookesschen Röhren die Kanalstrahlen und es hatte sich gezeigt, daß diese aus geschleuderten positiven Elektronen bestehen. Sie werden nämlich durch einen Magneten gerade nach der entgegengesetzten Richtung abgelenkt wie die Kathodenstrahlen. Ihre Geschwindigkeit ist ca. 1000mal geringer als die der Kathodenstrahlen, und es ist wahrscheinlich, daß in ihnen nicht die positiven Elektronen frei für sich vorhanden sind, sondern daß sie aus größeren Komplexen von Materie (Gasteilchen), verbunden mit positiven Elektronen, bestehen.

Eine dritte Art von Strahlen, die aus der Crookesschen Röhre entstehen, ist die bekannteste und für praktische Zwecke die wichtigste, die Röntgenstrahlen. Von ihren Eigenschaften sei hier nur, wegen des folgenden, an zwei erinnert. Erstens werden die Röntgenstrahlen nicht, wie die Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen, durch den Magneten beeinflußt. Sie werden weder nach der einen noch nach der anderen Seite von einem Magneten abgelenkt. Zweitens, und das ist eine positive Eigenschaft, haben sie die Wirkung, die Luft leitend zu machen, zu ionisieren, wenn sie dieselbe durchstrahlen. Um diese Tatsache einfach zu beweisen, braucht man nur ein Goldblattelektroskop zu nehmen und durch einen geriebenen Glasstab oder Ebonitstab die Goldblättchen zu elektrisieren. Dann stoßen sie sich ab und bleiben in der Luft sehr lange Zeit unverändert in der gespreizten Stellung. Sobald man aber in der Nähe Röntgenstrahlen erzeugt, fallen sie sehr rasch zusammen, ein Beweis, daß die Luft die Eigenschaft zu isolieren verloren hat und nun ein Leiter geworden ist.

Die Frage nach der Natur der Röntgenstrahlen, die von Röntgen nicht erledigt wurde, nach der eigentlichen Ursache, welche ihre Entstehung veranlaßt, entfesselte viele Bemühungen. Man suchte diese eigentliche Ursache und dadurch die Natur dieser Strahlen aufzufinden, und durch die Verfolgung dieser Bestrebungen kam man unerwartet zu der Entdeckung einer Reihe von neuen Strahlen. Eine naheliegende Vermutung war nämlich folgende: Da die Röntgenstrahlen von derjenigen Stelle einer Crookesschen Röhre ausgehen, welche von den Kathodenstrahlen getroffen und dadurch zu sichtbarer oder unsichtbarer Phosphoreszenz gebracht wird, so lag der Gedanke nahe, daß die Phosphoreszenz selbst die Ursache sei, daß die Röntgenstrahlen nur eine Begleiterscheinung derselben seien. Aus diesem Gedanken heraus suchte man, ob nicht auch diejenigen Substanzen, die durch das gewöhnliche Licht zur Phosphoreszenz oder Fluoreszenz gebracht werden, Röntgenstrahlen aussenden. Das zeigte sich zwar im allgemeinen nicht erfüllt, aber es gelang einem französischen Forscher, Becquerel, eine Reihe von fluoreszierenden Körpern zu finden, welche ebenfalls eigentümliche Strahlen aussenden, ganz ähnlich wie die Röntgenröhren. Diese Strahlen gingen auch durch Holz, Papier, Aluminium hindurch, wie die Röntgenstrahlen, sie schwärzten photographische Platten und erzeugten auch Fluoreszenz. Der erste Körper, an dem diese Eigenschaft entdeckt wurde, war ein Salz, das Urankaliumsulfat, welches, wenn es beleuchtet wird, fluoresziert. Dann fanden sich noch eine Reihe anderer fluoreszierender Stoffe, welche auch diese sonderbaren Strahlen ausgaben, z. B. das Uranosulfat, das Uranoxyd, das Uransäurehydrat u. a. Endlich fand Becquerel, daß alle Uransalze, aber nur diese, solche Strahlen geben, so daß also diese Eigenschaft an das Atom des Urans gebunden ist. Ja es zeigte sich, daß die Körper gar nicht vorher belichtet zu sein brauchten, also gar nicht zu fluoreszieren brauchten, sondern daß sie monatelang im Dunkeln aufbewahrt sein konnten, und doch diese Strahlen ausgaben. Schließlich fanden sich die Strahlen auch bei dem metallischen Uran, welches kein fluoreszierender Körper ist, so daß also die Ausgangshypothese zwar nicht bestätigt war, daß man aber von dem Uranatom ausgehend eine

neue Art Strahlen gefunden hatte, welche man ursprünglich Uranstrahlen nannte. Jetzt nennt man sie und die ihnen ähnlichen Becquerelstrahlen.

Außer den Uranverbindungen erwiesen sich noch die Verbindungen eines anderen seltenen Elements, des Thoriums, als strahlende Körper. Die Strahlen, die diese Körper aussenden, und die man von den Lichtstrahlen dadurch leicht unterscheiden kann, daß die ersteren durch schwarzes Papier, ja sogar durch dünnes Aluminiumblech hindurchgehen, was die Lichtstrahlen nicht tun, diese Strahlen wirken, wie gesagt, auf photographische Platten (wenn auch erst nach stundenlanger oder sogar tagelanger Exposition), sie erzeugen Fluoreszenz und sie haben insbesondere auch die Eigenschaft, die Luft leitend zu machen, also Elektroskope zu entladen. Je größer der Gehalt eines Körpers an Uran ist, um so größer ist auch diese elektroskopische Wirkung.

Man kann daher sogar diese Wirkung auf das Elektroskop dazu benutzen, um die Strahlungsfähigkeit dieser Substanzen quantitativ zu vergleichen. Ladet man ein solches Elektroskop zu einem bestimmten Ausschlag der Goldblättchen, der z. B. 500 Volt Spannung entspricht, und bringt man verschiedene dieser Salze der Reihe nach in gleichen Gewichtsmengen in die Nähe desselben, so kann man die Zeit messen, in welcher die Goldblättchen um bestimmte Strecken zurückgegangen sind, d. h. man kann die Zeit messen, in welcher die Spannung etwa von 500 Volt auf 400 Volt abgenommen hat. Je kürzere Zeit zu dieser Abnahme notwendig ist, um so stärker strahlend ist der betreffende Körper. Man bezeichnet diese Art von strahlenden Körpern allgemein als radioaktive Körper und ihre Eigenschaft, Strahlen auszusenden, als Radioaktivität. Die Schnelligkeit der Entladung eines Elektroskops ist danach ein Maß für die Größe der Radioaktivität der Körper (immer auf gleiche Gewichtsmengen bezogen).

Mit solchen quantitativen Messungen an verschiedenen uranhaltigen Stoffen beschäftigte sich in Paris Frau Curie und sie fand, daß die sogenannte Uranpechblende aus Joachimsthal in Böhmen eine außerordentlich starke elektroskopische Wirkung hatte, eine viermal größere, auf gleiche Gewichte bezogen, wie das metallische Uran selbst. Daraus schloß sie mit Recht, daß diese Wirkung nicht vom Uran selbst herrühren könne, sondern daß in der Pechblende noch ein weiterer strahlender oder radioaktiver Stoff vorhanden sein müsse, und sie ging daran, ihn durch chemische Behandlung der Pechblende zu isolieren. Durch mühsame Arbeit, bei der immer das Elektroskop als Reagenzmittel diente, gelang es ihr schließlich, zwei Körper aus der Pechblende abzuscheiden, welche viele hunderttausendmal stärker aktiv waren, auf gleiche Gewichte bezogen, wie die Pechblende selbst und wie das Uran. In der Joachimsthaler Pechblende sind nämlich außer dem Uran noch eine ganze Reihe anderer Metalle, wenn auch in kleinen Quantitäten, enthalten. Die beiden so stark aktiven Körper waren nun zwei von den Metallen, deren Vorhandensein in der Pechblende bekannt war, nämlich das Wismut und das Barium. Da aber gewöhnliches Wismut und gewöhnliches Barium gar keine Radioaktivität besitzen, so schloß sie, daß diese beiden Stoffe noch weitere, unbekannte Stoffe in kleinen Mengen beigemischt

enthalten müßten, und daß diese die eigentlichen aktiven Stoffe wären. Da die Eigenschaften des radioaktiven Wismuts und die des Bariums sehr verschieden waren (bei dem ersten verschwand die Aktivität nach einiger Zeit, bei dem zweiten blieb sie dauernd bestehen), so nahm sie zwei aktive Körper an, das Polonium, welches dem Wismut, und das Radium, welches dem Barium beigemengt sei. Weitere Untersuchungen haben gelehrt, daß sich sicher noch ein weiterer radioaktiver Körper aus der Pechblende abscheiden läßt, nämlich das Aktinium, das chemisch sich wie Thorium verhält. Andere radioaktive Körper, die aus der Pechblende abgeschieden wurden, das Radioblei und Radiosilber verdanken ihre Aktivität vermutlich geringen Beimengungen von Radium. Übrigens werden aus der Pechblende die radioaktiven Substanzen nicht als Metalle abgeschieden, sondern als Metallsalze. Das radioaktive Barium wird gewöhnlich in der Verbindung mit Chlor oder Brom als aktives Chlorbarium oder Brombarium gewonnen.

Die Frage, ob es wirklich besondere aktive Stoffe sind, die den bekannten chemischen Substanzen hierbei beigemengt sind, ist für das Radium mit Sicherheit, für das Polonium und Aktinium mit großer Wahrscheinlichkeit bejahend zu beantworten. Das Chlorsalz ebenso wie das Bromsalz des Radiums sind löslicher als die des Bariums. Durch fortgesetzte Lösung und Auskristallisierung des radioaktiven Chlorbariums oder Brombariums gelang es schließlich, diese Substanz in zwei Portionen zu trennen, von denen die eine nur das inaktive Bariumsalz enthielt, während die zweite die neue Substanz, das Chlorradium resp. Bromradium in großer Reinheit war. Der Beweis dafür wurde zunächst durch die Spektralanalyse geführt. Die fortgesetzte Reinigung des aktiven Bariums ließ schließlich die Bariumlinien aus dem Spektrum vollständig verschwinden und man erhielt ein neues, sonst unbekanntes Spektrum, das sich hauptsächlich durch einige violette Linien auszeichnet, und welches eben das des Radiums ist. Während eine Flamme durch Chlorbarium grün gefärbt wird, wird sie durch Chlorradium rot gefärbt. Man konnte auch das Atomgewicht des Radiums bestimmen, welches sich zu 225 ergab, und es zeigte sich, daß das Radium, das Thorium und das Uran die schwersten aller Atome besitzen, die größten Atomgewichte haben, nämlich Radium 225, Thorium 232, Uran 240.

Die Herstellung des reinen Radiums ist eine außerordentlich mühsame. Aus Tausenden von Kilogrammen Pechblende erhält man einige Dezigramm Radiumsalz. Daher ist auch der Preis des Radiums ein enormer. Ein Milligramm kostet heute zirka 40 Mark, während ein Milligramm Gold noch nicht 0,3 Pfennig wert ist. Die gesamte Menge des Radiums, die jetzt auf der Welt rein vorhanden ist, dürfte kaum einige Gramm übersteigen. In Frankreich sind es Herr und Frau Curie, in Deutschland Prof. Giesel in Braunschweig (Chemische Fabrik von Buchler & Co.), welche die Abscheidung des Radiums ausgeführt haben.

Das Radium, das Thorium, das Uran, das Polonium und das Aktinium geben also fortwährend Becquerelstrahlen aus und man hat sich natürlich zunächst und schon seit Jahren gefragt, woher nehmen diese Körper denn die Energie, die sie fortwährend von sich ausstrahlen, scheinbar ohne sich zu erschöpfen? Fünf Jahre lang werden jetzt Stücke Ra-

dium untersucht und sie haben sich weder an Gewicht, noch in der Fähigkeit, Strahlen auszusenden, irgendwie verändert. Man konnte sogar in interessanter Weise wenigstens von der Pechblende zeigen, daß sie in mehr als 100 Jahren ihre Strahlungsfähigkeit nicht verloren hat. Im Naturalienkabinett in Wien sind zwei Stücke Joachimsthaler Pechblende aufbewahrt, die vor über 100 Jahren, wie aktenmäßig festgestellt wurde, dorthin kamen, und eine jetzt vorgenommene Prüfung hat gezeigt, daß diese genau so strahlen wie die frisch entnommenen Stücke.

Von den fünf verschiedenen radioaktiven Substanzen zeigt das Radium, wegen der Reinheit, in der es hergestellt wird, die Eigenschaften der Becquerelstrahlen in besonders starkem Maße. Die Becquerelstrahlen machen, und das ist eine ihrer wichtigsten Eigenschaften, die Luft, durch welche sie strahlen, zu einem Leiter, sie ionisieren die Luft. Radium wirkt darin zwar nicht so stark, wie die Röntgenstrahlen, aber doch außerordentlich viel kräftiger wie etwa die Uransalze. Wenn man in Fig. 306 das Elektroskop etwa durch Berührung des Knopfes K mit einem geladenen Glasstab oder Ebonitstab ladet, so daß die Goldstreifchen S divergieren, und nun mit der Hand ein Gläschen R mit einem Zehntelmilligramm Radium in die Nähe bringt, so fallen die Goldblättchen in weniger als einer Sekunde zusammen, weil eben die leitend gewordene Luft die Ladung des Elektroskops zur Erde führt.

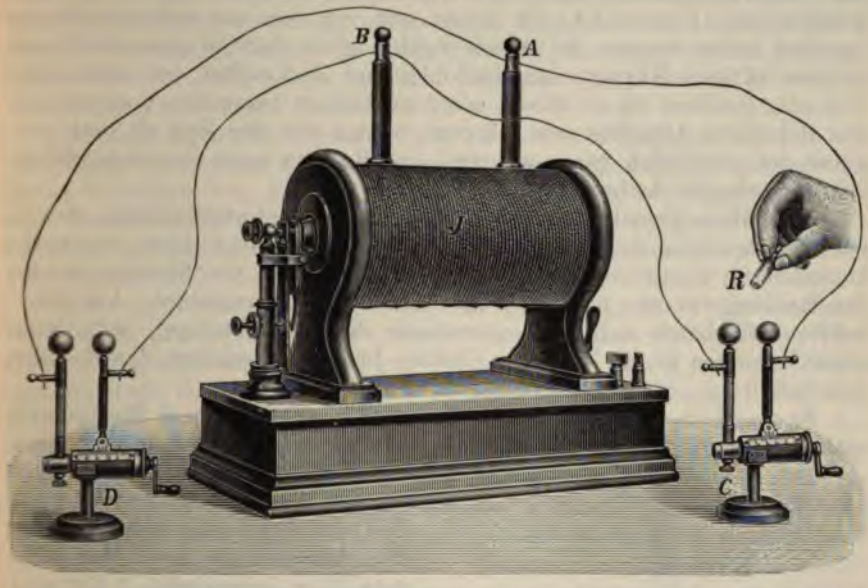
Fig. 306.

Man kann die Ionisierung der Luft noch durch ein anderes Experiment zeigen, das in Fig. 307 dargestellt ist. Man verbindet zwei gleiche Funkenmikrometer C und D (wie sie auf S. 284 beschrieben sind), parallel geschaltet, mit einem Induktionsapparat J. Die Kugeln jedes der beiden Mikrometer werden so weit voneinander entfernt, daß gerade die Schlagweite des Induktionsapparates erreicht ist. Macht man den Kugelabstand in C etwas größer, so springen dann bloß in D die Funken über, macht man den Abstand von D größer, so springen die Funken bloß in C über. Wenn man nun z. B. den Kugelabstand in C größer gemacht hat als in D, so daß nur bei D Funken vorhanden sind, und man nun in die Nähe von C das Gläschen R mit Radium hält, so springen die Funken sofort in C über. Denn die Luft in der Nähe von C ist nun leitend geworden und es ist eine viel geringere Spannung nötig, um jetzt hier den Luftwiderstand zu überwinden, so daß die Funken trotz der größeren Entfernung der Kugeln noch leicht übergehen.

Photographische Platten werden durch Radiumsalze geschwärzt und zwar auch durch Papier, Holz, dünnes Metall hindurch. Die Unterschiede in der Durchstrahlbarkeit sind aber für verschiedene Körper lange nicht so erheblich wie für die Röntgenstrahlen. Fleisch und Knochen z. B. lassen die Becquerelstrahlen merklich gleich hindurch, so daß es nicht

möglich ist, ein Knochenbild der Hand durch sie zu bekommen. Eine photographische Aufnahme eines Portemonnaies mit einer Münze und

Fig. 307.



einem Schlüssel, die von Frau Curie herrührt, ist in Fig. 308 abgebildet. Die Schärfe dieses Schattenbildes ist, wie man sieht, nicht vergleichbar mit derjenigen, die man bei Röntgenbildern erhält.

Fig. 308.

Auch Fluoreszenzschirme werden von den Radiumsalzen zum Leuchten gebracht, aber auch diese Wirkung ist viel schwächer wie bei den Röntgenstrahlen. Immerhin kann man einen phosphoreszierenden Körper wie Willemit, wenn man ihn in die Nähe von (freiem, nicht eingeschlossenem) Radium bringt, zu so hellem Leuchten kommen sehen, daß man dasselbe im hellen Zimmer beobachten kann.

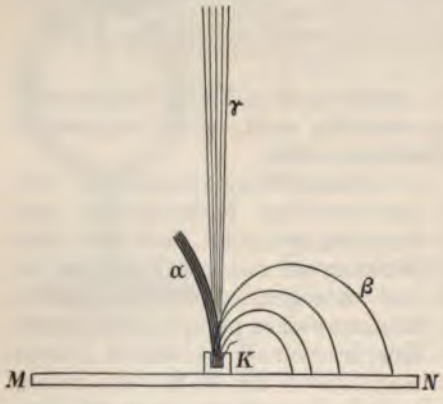
Eine höchst sonderbare Wirkung des Radiums, des Thoriums und Aktiniums ist die, daß alle Körper, die eine Zeitlang in der Nähe dieser Körper sich befinden, vorübergehend selbst radioaktiv werden. Man sagt, sie enthalten induzierte oder mitgeteilte Radioaktivität. Wenn das Radium dagegen in ein Gefäß eingeschlossen ist, so vermag es die benachbarten Körper nicht zu indu-

zieren. Diese Beobachtung weist darauf hin, daß von dem Radium ein gasförmiges Etwas ausgeht, welches sich auf benachbarte Körper ansetzen und niederschlagen kann. In der Tat geht von dem Radium und ebenso von dem Thorium und dem Aktinium ein solcher gasförmiger Stoff aus, welchen man Emanation nennt und von dem wir weiter unten zu sprechen haben werden. Es ist sehr wohl möglich, daß die oben erwähnten anderen aktiven Körper, das Radioblei und Radiosilber nur induzierte Aktivität besitzen, da sie immer mit dem Radium zusammen vorkommen. Die induzierte Aktivität von Körpern nimmt mit der Zeit ab und verschwindet allmählich ganz, während das Radium seine Strahlungsfähigkeit unverändert beibehält.

Die nähere physikalische Untersuchung der Radiumstrahlung, ebenso wie der Strahlung des Thoriums, hat nun gezeigt, daß diese eine recht komplizierte, zusammengesetzte ist. Dreierlei Arten von Strahlen sendet das Radium aus, die man als α-, β-, γ-Strahlen unterscheidet. Am deutlichsten offenbaren sich die Unterschiede dieser Strahlungen, wenn man einen Magneten in die Nähe des Gefäßes bringt, in welchem das Radium sich befindet.

Es sei K in Fig. 309 ein kleines Gefäß, welches etwas Radiumsalz enthält, und wir denken uns einen Magnetstab mit einem Pole dicht vor das Gefäß gebracht. Dann gibt es, wie die Figur andeutet, einen Teil der Strahlen, welcher trotz der Anwesenheit des Magneten geradlinig herausgeht. Es sind das die unablenkbaren Strahlen, welche man als γ-Strahlen bezeichnet. Die anderen Teile der Strahlung aber sind ablenkbar. Aber unter diesen gibt es wieder einen Teil, welcher bei der angenommenen Lage des Magnetpols etwa nach rechts, einen anderen, welcher gerade umgekehrt nach links abgelenkt wird. Die ersteren nennt man β-Strahlen, die letzteren α-Strahlen. Diese drei Strahlenarten nun verhalten sich ganz so wie die drei Strahlengattungen in der Crookesschen Röhre, von denen oben gesprochen wurde.

Fig. 309.



Die β-Strahlen nämlich führen negative elektrische Ladung mit sich, sie entsprechen also den Kathodenstrahlen. Ganz wie diese laden sie die Körper, auf die sie fallen, negativ elektrisch, sie gehen durch dünne Schichten von fremden Substanzen hindurch, durch dünnes Papier, Glas, aber auch durch dünne Metalle, sie werden von Magneten und von elektrostatisch geladenen Körpern ebenso und in derselben Richtung wie diese abgelenkt, kurz sie bestehen wie die Kathodenstrahlen aus negativen Elektronen. Ja man konnte auch bei ihnen aus der magnetischen und der elektrostatischen Ablenkung, welche sie erfahren, berechnen, wie groß ihre Geschwindigkeit und ihre spezifische Ladung ist, und es ergab sich,

daß sie eine noch fast dreimal so große Geschwindigkeit besitzen wie die Kathodenstrahlen, daß also ihre Geschwindigkeit die des Lichts erreicht.

Die zweite Sorte von ablenkbaren Strahlen, die α-Strahlen sind positiv geladen und entsprechen durchaus den Kanalstrahlen. Sie werden sehr leicht absorbiert, schon durch dünnes Papier und auch durch die Luft selbst, und auch bei ihnen scheinen, wie man aus der geringen Ablenkbarkeit sieht, immer größere Partieen von positiven Elektronen und Massen zusammen verbunden zu sein.

Endlich die unablenkbaren γ-Strahlen verhalten sich sehr ähnlich wie die Röntgenstrahlen. Sie sind unablenkbar wie diese, sie gehen durch dicke Schichten von Körpern hindurch, sind die durchdringendsten der drei Strahlenarten und haben also, in abgeschwächtem Maße, die Eigenschaften der Röntgenstrahlen. Aber allerdings scheinen sie, abweichend von diesen, auch elektrisch geladen zu sein.

Aber mit diesen drei Strahlenarten ist die Kenntnis des Radiums noch nicht erschöpft, vielmehr sendet das Radium, wie auch das Thorium und das Aktinium (Uran und Polonium aber nicht), noch ein Etwas aus, das man eine Emanation nennt. Trockenes Radium allerdings zeigt dieses Etwas nur in sehr geringem Grade, aber wenn man das Radiumsalz in Wasser auflöst, so zeigen sich in seiner Nähe elektrische Wirkungen an, welche die besondere Eigentümlichkeit haben, daß sie durch jeden Luftstrom beeinflußt werden, während die drei erwähnten Strahlenarten ganz unabhängig von jeder Luftbewegung aus dem Radium austreten. Das diese Wirkungen Hervorbringende nennt man Emanation.

Die Emanation verhält sich wie ein leicht bewegliches Gas, welches aus dem Radium sich entwickelt, und zwar sind seine elektrischen Wirkungen derart, als ob es positiv geladen wäre. Man kann nun allerdings absolut nichts von einer Gasentwickelung am Radium merken. Das Radium verliert, wie gesagt, nichts an Gewicht. Sein Gewicht bleibt, soweit die genauesten Wägungen festzustellen gestatten, in Jahren dasselbe. Läßt man die Emanation in ein ausgepumptes Gefäß eintreten, so kann man nicht eine Spur von Druckerhöhung mit den besten Manometern wahrnehmen. Trotzdem muß die Emanation etwas wie ein materielles Gas sein, denn sie hat alle Eigenschaften eines Gases. Bringt man sie in ein Gefäß, welches man dann durch einen Hahn mit einen zweiten Gefäß in Verbindung setzt, so teilt sich die Emanation zwischen beide Gefäße im Verhältnis ihrer Volumina, so wie es ein Gas tut. Die Emanation geht durch enge Röhren langsam hindurch, sie diffundiert wie ein Gas durch dieselben. Man kann die Emanation sogar zum Gefrieren bringen. Wenn man die Emanation in einem Glasrohr hat und dieses durch flüssige Luft auf — 190° C. abkühlt, so hören die Wirkungen der Emanation vollständig auf, sie scheinen verschwunden zu sein. Erwärmt man das Rohr wieder, so erscheint auch die Wirkung von neuem, ganz so, als ob die Emanation eingefroren und dann wieder aufgetaut wäre. Aber, wie gesagt, man kann mit den feinsten Meßinstrumenten nichts von ihr erkennen, außer indem man ihre elektrischen Wirkungen untersucht. Im Dunklen leuchtet die Emanation. Ein Glasgefäß, das sie enthält, ist im Dunklen sichtbar und wenn die Emanation durch ein enges Glasrohr aus einem Gefäß in ein zweites diffundiert, so kann man ihr Fortschreiten im Dunklen

durch das Leuchten beobachten. Hebt man die Emanation längere Zeit in einem Gefäß auf, so verschwindet allmählich das Leuchten. Das Leuchten der Emanation beruht übrigens darauf, daß das Glas, das mit ihr in Berührung kommt, fluoresziert.

Man kann die Kondensation und Wiedervergasung der Emanation durch einen schönen von Soddy herrührenden Versuch deutlich und sogar für ein größeres Auditorium sichtbar machen. Zu dem Zweck dient der Apparat, der in Fig. 310 gezeichnet ist. Man löst einige Milligramm Radiumbromid in Wasser in einer Flasche A auf. Es entwickelt sich sofort über der Lösung die Emanation. Durch einen ganz langsamen Luftstrom treibt man diese in das lange enge Rohr C D, in welchem man an einigen Stellen $\alpha\,\alpha$ kleine Diamantsplitter eingelegt hat. Dann beobachtet man im Dunklen an dem Leuchten der Diamanten, wann die Emanation dieselben erreicht hat. Die Emanation dringt dann bei D in die Glasspirale ein, welche von einem doppelwandigen Glasgefäß G umgeben ist. Hinter der Spirale ist ein langes Glasrohr F angebracht, in welchem ein langer Glimmerstreifen befestigt ist, der mit Zinkblende bestrichen ist. Wenn die Emanation diesen erreicht, so leuchtet er unter ihrem Einfluß. Gießt man nun aber in das Gefäß G (eine sogenannte

Fig. 310.

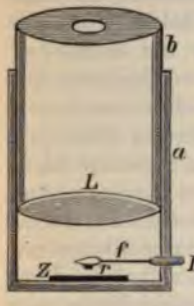
Dewarsche Flasche) flüssige Luft (Temperatur — 190°), so wird die Emanation in der Spirale kondensiert, trotz des Luftstromes erreicht sie F nicht, die Zinkblende bleibt dunkel. Nimmt man nun das Gefäß G fort, so daß die Spirale sich erwärmt, so taut die Emanation wieder auf und wird nun von dem Luftstrom nach F geführt. Während sie dort in die Höhe steigt, bringt sie auf dem Zinksulfidschirm eine Zone glänzenden Leuchtens, Fluoreszierens hervor.

Die Emanation ist nun auch die Ursache der induzierten, der mitgeteilten Radioaktivität. Denn wenn ein Gas auch nur in geringen Mengen von dem Radium ausgeht, so kann dasselbe auf andere Körper sich niederschlagen und dadurch diese aktiv machen.

Eine sehr reizvolle Beobachtung, die Crookes gemacht hat, beruht auf den α-Strahlen. Das Zinksulfid ist ein phosphoreszierender Körper, welcher wie durch gewöhnliches Licht, so auch durch Radiumstrahlen zum Leuchten gebracht wird. Wenn man nun einen mit Zinksulfid be-

strichenen Karton, einen Zinksulfidschirm, von einem Stückchen Radium bestrahlen läßt und im Dunklen die erregte Phosphoreszenz mit einer Lupe vergrößert betrachtet, so sieht man nicht etwa ein gleichmäßiges Leuchten, sondern ein Szintillieren. Die Teilchen des Kartons werden abwechselnd bald da, bald dort zum Leuchten gebracht, der Anblick ist so, wie wenn der Mond sich in fließendem Wasser spiegelt. Es ließ sich zeigen, daß es die α-Strahlen sind, welche dieses Szintillieren erzeugen, welche abwechselnd die Teilchen des Schirmes zum Leuchten bringen.

Fig. 311.



Sehr bequem kann man diese Erscheinung mit einem kleinen Apparat beobachten, den man Spintheroskop (von σπινθήρ, Spinther, Funken) nennt. Er ist in Fig. 311 im Durchschnitt gezeichnet. Eine Messinghülse a trägt am Boden ein Stück Zinksulfidpapier z. Über demselben, in etwa 1 mm Entfernung, ist ein kleiner Zeiger f angebracht, welcher ein winziges Stückchen Radium r trägt. Der Zeiger läßt sich von außen durch das Rädchen R drehen. Durch die verschiebbare Lupe L kann man auf den Schirm genau einstellen. Beobachtet man nun durch die Öffnung in der Deckplatte des Apparates, so sieht man eine Erscheinung, die durch Fig. 312 angedeutet ist. Vollkommen läßt sie sich im Bilde nicht fixieren, weil sie eben besonders durch die raschen Wechsel, das Szintillieren, ausnehmend reizend ist.

Fig. 312.

Durch diese dreierlei verschiedenen Arten von Becquerelstrahlen und durch die Emanation gibt also ein Stück Radium fortwährend Energie nach außen ab. Allerdings ist der Betrag dieser Energie ein sehr geringer. Aber eine äußerst wichtige Beobachtung zeigt, daß es sich doch bei diesen radioaktiven Erscheinungen noch um viel größere Energiemengen handelt, als man ursprünglich annehmen konnte. Das Radium strahlt nämlich auch fortwährend Wärme aus. Curie hat die merkwürdige Tatsache entdeckt, und sie ist von verschiedenen Seiten bestätigt und quantitativ geprüft worden, daß ein Stück Radium immer eine Temperatur hat, die um zirka 1^0 höher ist als die Umgebungstemperatur. Bringt man es in einen Raum von 20^0, so hat es 21^0, bringt man es in einen Raum von 40^0, so hat es 41^0. Infolge der höheren Temperatur gibt es also immer Wärme durch Leitung und Strahlung an die Umgebung ab, und zwar haben messende Versuche ergeben, daß 1 g Radium pro Stunde 100 Kalorieen nach außen abgibt. Daraus folgt, daß, um bloß die Wärmeabgabe nach außen zu decken, ein solches Gramm pro Stunde

auch einen Betrag von Energie, der 100 Kalorieen äquivalent ist, entweder durch Absorption äußerer Energieen (Strahlung) aufnehmen muß, oder aber, daß dieser Betrag durch innere Umwandlung frei werden muß.

Die Tatsache, daß ein Stück Radium fortgesetzt und ununterbrochen Elektronen aussendet, einerseits freie negative und andererseits positive in größeren Korpuskeln, hat zu einer Hypothese geführt, welche einen weitreichenden Ausblick in die Fortentwickelung der Physik und Chemie gewährt. Wenn die Elektronen fortwährend ausgesendet werden, so führt das fast notwendigerweise zu der Annahme, daß diese Elektronen schon in dem Körper vorhanden seien und daß die Atome der Körper in Wirklichkeit nur Zusammensetzungen von Elektronen in verschiedenfacher Anordnung seien. Nach dieser Hypothese sind die Atome selbst zusammengesetzte Körper und es wird nur von den angewandten Mitteln abhängen, ob man ein Atom, ein scheinbar Unteilbares, nicht doch zerteilen kann, eine Anschauung, die übrigens nicht neu ist, sondern nur durch die Auffassung der Elektronen als der Teile der Atome präzisiert ist. Die radioaktiven Stoffe nun lassen sich danach auffassen als Stoffe, deren Elektronen in einem labilen Zustand sich befinden, so daß das Atom selbst in einem dauernden Zustand der Zersetzung und der teilweisen Rückbildung sich befindet. Die Tatsache wenigstens, daß die β-Strahlen aus negativen Elektronen bestehen, findet die einfachste Erklärung darin, daß eben die Elektronen in dem Radiumatom schon enthalten sind und von demselben fortfliegen. Ebenso würden die α-Strahlen aus größeren Partikeln des Atoms bestehen, positiven und negativen Elektronen zusammen, bei denen jedoch die positiven im Überschuß sind. Man kann darauf hinweisen, daß gerade die größten und schwersten Atome (das Uran, Radium, Thorium) derartige labile Körper sind, ebenso wie nach der Kant-Laplaceschen Theorie des Sonnensystems auch die größten Himmelskörper am leichtesten Teile (Monde, Ringe) absondern müssen, ihren Zusammenhang nicht mehr festhalten können.

Das ist allerdings nur eine Hypothese, welche aber erlaubt, wenigstens vorläufig, sich eine Vorstellung zu machen, wie die merkwürdigen Eigenschaften des Radiums vielleicht zusammenhängen können.

Wenn man diese Hypothese im Auge behält, so kann man sich leichter ein Bild von den sonderbaren Erscheinungen machen, die ein näheres Studium der radioaktiven Substanzen zu Tage gebracht hat. Wenn man die Emanation des Radiums in ein mit Luft gefülltes Gefäß bringt und dann das Gefäß schließt und die Emanation sich selbst überläßt, so bleibt die Wirkung der Emanation (die sich durch Leitendwerden der Luft zu erkennen gibt) nicht etwa auf unveränderlicher Höhe, sondern sie sinkt allmählich herunter und zwar so, daß die Abnahme in bestimmter Zeit immer derselbe Bruchteil der noch vorhandenen Energie ist. In 4 Tagen etwa sinkt die Wirkung der Emanation auf die Hälfte der Anfangswirkung, in weiteren 4 Tagen auf ein Viertel u. s. f. Dieses Gesetz der Abnahme zeigt sich bei der Radiumemanation immer erfüllt, so daß es ganz gleichgültig ist, ob die Emanation in Luft oder in anderen Gasen sich befindet, ob das Gefäß groß oder klein ist, ob viel oder wenig Emanation zunächst vorhanden war. Die Emanation des Thoriums sinkt dagegen schon in 60 Sekunden auf den halben Betrag, die des Aktiniums sogar schon

in 4 Sekunden. Diese Zeiten, die man als Abklingungskonstanten bezeichnet, sind so charakteristisch, daß man bei einer unbekannten Emanation aus der Messung der Zeit, in der ihre Wirkung auf die Hälfte heruntergeht, also an der Abklingungskonstante, mit Sicherheit schließen kann, ob man es mit einer Emanation des Radiums, Thoriums, Aktiniums oder mit einer anderen Art der Emanation zu tun habe.

Nach der oben angeführten Vorstellung des Atomzerfalls teilt sich das Radiumatom in einen Bestandteil, welcher eben die Emanation ist, und in einen anderen Bestandteil, welcher die α-Strahlen bewirkt. Die Emanation aber bleibt selbst nicht unverändert, sondern sie zerfällt auch und zwar, wie erwähnt, wird in 4 Tagen die Hälfte von ihr von neuem in andere Stoffe verwandelt.

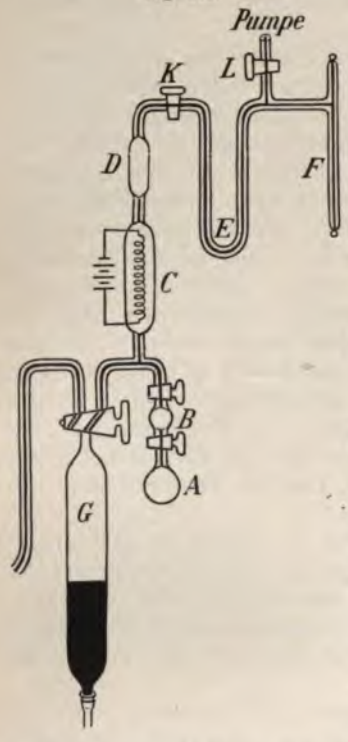
Durch diese Umwandlung der Emanation scheint sich derjenige Stoff zu bilden, der den in der Nähe des Radiums befindlichen Körpern die induzierte Aktivität verleiht. Diese induzierte oder mitgeteilte Aktivität tritt nur auf, wenn Radiumemanation vorhanden ist, sie ist also von dieser veranlaßt. Aber es ist nicht etwa die Emanation selbst, welche sich auf den Wänden der Gefäße oder auf hineingebrachten Körpern festsetzt. Denn wäre sie es selbst, so müßte die mitgeteilte Aktivität auch ebenso wie die Emanation in 4 Tagen auf die Hälfte herabsinken. Das ist aber nicht der Fall, sondern sie verschwindet viel rascher. Schon in 29 Minuten sinkt sie auf die Hälfte herab. Es ist also folgerichtig anzunehmen, daß die Radiumemanation ebenfalls keine beständigen Atome besitzt, sondern daß diese selbst in eine neue Materie zerfallen, welche sich an festen Körpern festsetzt und eben die induzierte Aktivität hervorbringt. Beim Thorium zerfällt, wie gesagt, die Emanation viel rascher (in 60 Sekunden), aber die von ihr erzeugte mitgeteilte Aktivität hat ein viel zäheres Leben als die mitgeteilte Radiumaktivität, sie braucht nämlich $11\frac{1}{2}$ Stunden, um auf die Hälfte ihres Betrages herabzusinken.

So zeigt sich also, daß ausgehend vom Radiumatom sich hintereinander durch fortschreitende Zersetzung neue Stoffe bilden, die Emanation, dann die mitgeteilte Aktivität, welche aber selbst unbeständige, weiter zerfallende Körper sind. Welches ist nun der Schluß dieser fortschreitenden Umwandlung, was wird schließlich aus den Teilen, die im Radiumatom enthalten sind?

Ein höchst wunderbares und überraschendes Experiment, das von dem hervorragenden englischen Forscher Ramsay herrührt, gibt darauf eine ebenso bestimmte wie unerwartete Antwort. Ramsay ist bekanntlich der Entdecker der neuen Elemente in der Atmosphäre, des Argon, Xenon, Krypton, Neon und des Helium, des sonderbaren Elementes, das man zuerst in dem Spektrum der Sonnenkorona durch eine auffallende gelbe Linie im Spektrum gefunden hatte, bis es sich nach langer Zeit auch bei uns als gasförmiges Element aus verschiedenen Mineralien entwickeln ließ. Diese Gase alle haben die gemeinsame Eigenschaft, daß sie in gar keiner Weise bisher sich fähig gezeigt haben, chemische Verbindungen mit irgendwelchen Stoffen einzugehen. Sie werden von keinem chemischen Reagenzmittel angegriffen. Man bezeichnet diese Gruppe von Gasen daher als inerte (träge) Elemente. Ramsay hat nun die Emanation des Radiums in eine evakuierte Glasröhre ein-

treten lassen und indem er einen elektrischen Strom durch die Röhre sandte, wurde der Inhalt der Röhre leuchtend und ergab, durch ein Prisma beobachtet, ein kompliziertes Spektrum, welches Ramsay als das Spektrum der Emanation ansah. In diesem übrigens noch nicht publizierten Spektrum war aber sicher die gelbe Heliumlinie nicht enthalten. Als jedoch die evakuierte Röhre 3 Tage stehen geblieben war und danach wieder untersucht wurde, zeigte sich die gelbe Heliumlinie und es zeigten sich am folgenden Tage auch alle anderen Linien des Heliums, außerdem noch einige unbekannte Linien. Der Versuch wurde mit demselben Resultat oft wiederholt und es wurde stets konstatiert, daß, während die Röhre zuerst heliumfrei war, nach einigen Tagen Helium erschien. Die Art und Weise, wie dieses höchst wichtige Experiment angestellt wurde, geht aus Fig. 313 hervor. In einer kleinen Flasche A befinden sich 20 bis 30 mg Radiumbromid. In der Kugel B, die zunächst durch je einen Hahn von A und von oben abgeschlossen ist, befindet sich luftfreies reines Wasser. Die weiteren Teile des Apparates enthalten bei C eine oxydierte Kupferspirale, die durch einen elektrischen Strom zum Glühen gebracht werden kann, und bei D ein Gefäß, welches Phosphorpentoxyd zum Absorbieren alles Wassers enthält. Bei E ist ein U-Rohr, welches durch flüssige Luft abgekühlt werden kann, bei F die Spektralröhre, die ungefähr in $^1/_4$ natürlicher Größe gezeichnet ist, bei L ist eine Luftpumpe angeschlossen und von G aus kann man Quecksilber in den ganzen Apparat aufsteigen lassen. Nachdem alles vorbereitet ist, die Luft aus dem Apparat entfernt ist, wird das Wasser von B nach A gebracht, das Radiumbromid löst sich in Wasser auf und entwickelt die Emanation. Zugleich entwickelt es okkludierte Gase, Wasserstoff und Sauerstoff, die von der glühenden Kupferspirale in C absorbiert werden, ebenso wie Wasserdämpfe in D festgehalten werden. Nun läßt man von G aus Quecksilber aufsteigen und treibt dadurch die Emanation und alle etwaigen sonstigen Gase in die durch flüssige Luft gekühlte Röhre E, wo sich die Emanation verdichtet, während etwa schon vorhandenes Helium nicht verdichtet wird und durch die Pumpe bei L fortgeschafft wird. (Helium ist das einzige Gas, welches bisher überhaupt noch nicht in den flüssigen Zustand gebracht werden konnte.) Läßt man nun die Emanation wieder frei werden, so findet man in der Röhre F, wenn man sie durch ein Induktorium zum Leuchten bringt, nach 3 bis 5 Tagen die unzweifelhafte Anwesenheit von Helium. Der notwendige

Fig. 313.



Schluß daraus ist der, daß sich Helium aus der Radiumemanation gebildet hat, daß also das Helium das Endprodukt der vielfachen Umwandlungen des Radiums ist.

Was Jahrhunderte hindurch als das Ziel aller chemischen Forschung galt, die Umwandelung eines chemischen Elementes in ein anderes, was dann von der wissenschaftlichen Chemie als eine Utopie angesehen und aus dem Kreise ernsthafter wissenschaftlicher Bestrebungen ausgeschlossen wurde, das scheint dieser neueste Zweig der Wissenschaft nun doch in einem Falle realisiert zu haben. Zwar ist nicht Silber in Gold umgewandelt worden, wie es die alten Alchimisten erhofften, aber es ist durch spontane Zersetzung, wie es scheint, eine Substanz, die man Grund hatte für ein Element zu halten, wie das Radium, in ein anderes unzweifelhaftes Element, das Helium verwandelt worden, eines der schwersten Elemente in ein sehr leichtes. Überall wo in der Natur Radium vorhanden ist, muß nach dieser Auffassung auch Helium vorhanden sein, wenn es keinen Ausweg hat, sich in die Atmosphäre zu zerstreuen. Denn spontan entsteht aus dem Radium durch den Übergang über die Emanation dauernd Helium. Da Radium immer mit Uran und Thorium vorkommt, so versteht man nachträglich die Verwunderung von Ramsay, der das Helium zuerst aus irdischen Substanzen abgeschieden hatte, darüber, daß dieses nur in Mineralien vorkommt, die auch Uran und Thor enthalten. Darf man umgekehrt aus dem Vorhandensein von Helium auf das von Radium schließen, so muß Radium auch in der Sonne vorhanden sein, denn das Helium ist ein Element, welches zuerst auf der Sonne durch seine Spektrallinie gefunden war (der Name Helium kommt von ἥλιος, helios, Sonne), bevor man es auf Erden entdeckt hatte.

Eine schwierige Frage, welche dieser ganzen Theorie des Atomzerfalls entgegengehalten werden kann und muß, ist aber die, wie es möglich ist, daß überhaupt noch Radium auf der Erde vorhanden ist, da dasselbe sich doch seit Jahrtausenden fortwährend von selbst zerlegt und unablässig die Emanation und dann Helium entwickelt, außerdem auch α- und β-Teilchen ausstrahlt. Da seit Beginn der Erde diese Umsetzung stattfindet, so sieht man nicht ein, wieso überhaupt noch Radium und ebenso Thorium und Uran auf Erden vorhanden sind. Die einzige Möglichkeit, diese Frage zu beantworten, scheint darin zu liegen, daß man annimmt, daß sich das Radium und die anderen Elemente auch wieder bilden können. Und das ist tatsächlich die Folgerung, zu der die Begründer und Anhänger dieser Theorie gelangt sind. Sie nehmen an, daß diese schweren Elemente Uran, Radium, Thorium selbst die Produkte des Zerfalls anderer Elemente sind, daß insbesondere das Radium selbst ein Zerfallsprodukt des Urans ist, mit dem verbunden es in der Tat immer vorkommt. Wenn diese Umwandlung sehr langsam geschieht, so wäre es immerhin möglich, daß mit großen Quantitäten Uran doch noch minimale Quantitäten Radium gleichzeitig mit dem Endprodukt ihrer Entwickelung, dem Helium, vorkommen.

Doch sei es genug mit diesen hypothetischen Betrachtungen. Neue Experimente werden im Laufe der Zeit vermutlich auch hier eine Klärung bringen. Nur auf eine Folgerung aus der Radiumforschung sei hingewiesen. Da die Becquerelstrahlen die Luft ionisieren, so läßt sich in einem Raume,

in dem Radium längere Zeit vorhanden ist, eine elektrische Ladung gar nicht auf den Körpern halten, sondern sie wird sehr rasch zur Erde abgeleitet. Würde das Radium in der Natur in großen Mengen vorkommen, was es aber eben nicht tut, so wären die Eigenschaften der ruhenden Elektrizität gar nicht entdeckt worden, weil man nie einen Körper hätte geladen halten können. Wir können daraus unter anderem ersehen, von welchen Zufällen unsere Einsichten in die Natur doch abhängen, und können daraus die halb betrübliche, halb hoffnungsvolle Vermutung entnehmen, daß das, was wir von der Natur und speziell der Elektrizität nicht wissen, noch viel umfangreicher ist als dasjenige, was wir bereits kennen.

14. Kapitel.

Elektrizität und Licht.

Viele Jahre, ehe die Wissenschaft der Elektrizität durch die Entdeckungen von Hertz so weit war, daß sie den engen Zusammenhang zwischen der Elektrizität und dem Äther, dem Träger der Erscheinungen des Lichtes, erkannte, viele Jahre, ja sogar Jahrzehnte vorher hatte Faraday einen solchen Zusammenhang vermutet und durch Experimente zu beweisen gesucht. Wenn unter den vielen großartigen Entdeckungen von Faraday einer der Preis zu erteilen wäre in Bezug auf die Genialität der physikalischen Intuition, so ist es gerade die Entdeckung, von der wir in diesem Kapitel sprechen wollen, welche diesen gesuchten Zusammenhang zwischen Elektrizität und Licht offenbarte. Nicht als ob diese Entdeckung bisher von großer praktischer Bedeutung wäre. Die Induktionserscheinungen, die elektrolytischen Gesetze, beide ebenfalls große Taten Faradays, haben eine unendlich höhere praktische Bedeutung. Aber aus größerer Tiefe, aus unbekannterer Region kam keine Entdeckung, und in rein wissenschaftlicher Beziehung war keine Entdeckung von größerer Wichtigkeit als die Faradaysche der magnetischen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes. Sie war so tief, daß sie jahrzehntelang nur als eine wissenschaftlich merkwürdige Tatsache galt, aus der man keine weiteren Schlüsse ziehen konnte. Man mußte sich nur verwundern, wie ein Mensch nicht zufällig, sondern in bewußter Weise auf dieses Experiment kam. Faraday aber hatte stets die Anschauung, daß ein Zusammenhang zwischen Lichterscheinungen und elektrischen Erscheinungen existieren müsse, da er beide als Vorgänge im Äther ansah, und so handelte es sich für ihn nur darum, diesen Zusammenhang, über dessen Art man von vornherein nichts aussagen konnte, zu suchen und zu finden. Er probierte in der Tat zunächst, ob nicht während der Elektrolyse, wo ja die Ionen sich bewegen, ein Lichtstrahl, der durch den Elektrolyten gesendet wird, beeinflußt wird. Er ließ ihn in der Richtung des Stromes oder in der entgegengesetzten Richtung oder senkrecht zur Stromrichtung durch die Flüssigkeit gehen, ohne daß sich jemals, bei noch so feinen Anordnungen, irgend eine Wirkung zeigte. Aber seine Überzeugung von einem Zusammenhang war unerschütterlich, und so nahm er 1845 diese Versuche wieder auf, nur daß er diesmal statt der elektrolytischen Wirkungen des Stromes vielmehr die magnetischen Wirkungen desselben ins Auge faßte, und diesmal mit glänzendem Erfolg.

Um aber diesen Zusammenhang zu verstehen, müssen wir eine Tatsache besprechen, die aus der Lehre vom Licht bekannt ist, nämlich die Tatsache, daß man dem gewöhnlichen Licht durch einfache Hilfsmittel eine besondere Modifikation geben kann, die es für gewöhnlich nicht hat, eine Modifikation, mit der das Licht dann einfachere Verhältnisse als gewöhnlich erzeigt.

Dieses Hilfsmittel besteht einfach in einem Stück eines wasserhellen Kristalls, des Kalkspats, wie Fig. 314, der in einer bestimmten, uns nicht näher interessierenden Weise geschnitten ist. Ein solcher Kalkspat wird ein Nicolsches Prisma oder kurz ein Nicol genannt. Man bringt ihn in eine Metallfassung hinein, so daß man einen Lichtstrahl seiner Länge nach durch ihn hindurchsenden kann. Der Querschnitt des Kalkspats, den man an den Enden der Fassung sieht, hat die Form, wie sie aus Fig. 315 zu erkennen ist, ein schiefwinkeliges Viereck, dessen eine Diagonale erheblich größer ist als die andere. Die Ebene, die durch die längere Diagonale und den durch den Nicol gesendeten Lichtstrahl gelegt ist, nennt man die Polarisationsebene des Nicols und man markiert diese Ebene an der Fassung des Nicols häufig durch einen Pfeil. In Fig. 316 ist ein Nicol N in einer Fassung auf einem Gestell angebracht, welches außerdem noch eine drehbare, mit Löchern verschiedener Größe versehene Scheibe trägt, durch die man Lichtbündel von größerer oder kleinerer Dicke abgrenzen und durch den Nicol gehen lassen kann. Die an der Fassung des Nicols befestigten Papierfahnen geben die Richtung der Polarisationsebene an, sie haben die Richtung der längeren Diagonale von N. Diese Fahne wollen wir kurz als Pfeil bezeichnen. Läßt man einen gewöhnlichen Lichtstrahl, den man auch einen natürlichen Lichtstrahl nennt, durch einen solchen Nicol hindurchgehen, so ist das aus ihm heraustretende Licht modifiziert und man nennt es dann polarisiertes Licht. Daß es modifiziert ist und worin diese Modifikation besteht, erkennt man sofort, wenn man einen zweiten, ebenso beschaffenen Nicol anwendet. Das Licht, das von dem ersten Nicol kommt, geht nämlich durch den zweiten Nicol nicht hindurch, wenn dessen Pfeil senkrecht zum ersten steht. Es geht in gewöhnlicher Weise hindurch, wenn die Pfeile parallel sind, und es geht nur geschwächt hindurch, wenn die Pfeile irgendwie schief zu einander stehen. Diese sonderbare Eigenschaft, die man am gewöhnlichen Licht nie beobachtet, sondern nur am polarisierten, beruht darauf, daß in einem Nicol die Schwingungen des Lichtes überall und fortwährend nur nach derselben Richtung geschehen, niemals wechseln, und zwar hat man ermitteln können, daß sie immer senkrecht zu der Polari-

Fig. 314.

Fig. 315.

Fig. 316.

sationsebene stattfinden, also in der Richtung der kurzen Diagonale des Nicols. Steht also z. B. ein Nicol mit seiner Polarisationsebene horizontal und geht durch ihn ein Lichtstrahl hindurch, so geschehen in dem Lichtstrahl, innerhalb des Nicols und nach dem Austreten, die Schwingungen alle vertikal, auf und ab. Steht der zweite Nicol so, daß seine Polarisationsebene senkrecht zum ersten, also vertikal liegt, so können in ihm nur horizontale Schwingungen verlaufen; diese sind aber in dem ankommenden Licht nicht vorhanden, folglich kann dieses nicht durch den zweiten Nicol hindurchgehen. Ist dagegen in dem zweiten Nicol die Polarisationsebene auch horizontal, so geht das auffallende Licht glatt hindurch, und wenn er schief steht, so geht bloß eine Komponente des auffallenden Lichtes hindurch, es erscheint also geschwächt.

Wenn man daher durch zwei Nicols auf einen hellen Körper, eine Flamme, ein weißes Papier oder dergleichen hinsieht, so sieht man den Körper, wenn die beiden Polarisationsebenen des Nicols gleiche Richtung haben; man sieht ihn nicht, der Körper erscheint dunkel, wenn die beiden Polarisationsebenen senkrecht aufeinander stehen.

Man drückt diese Tatsache kurz so aus:

Durch parallele Nicols geht Licht hindurch, bei gekreuzten Nicols tritt Dunkelheit ein.

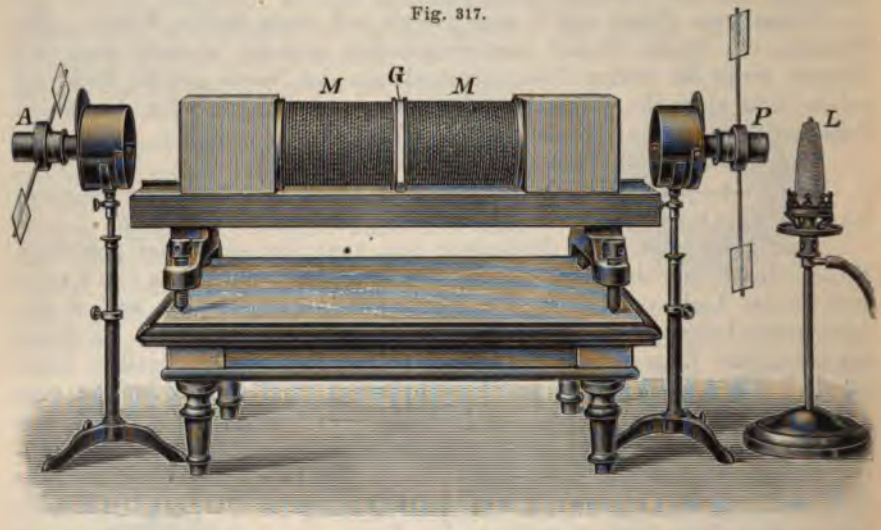
Man bezeichnet auch denjenigen von zwei hintereinander gestellten Nicols, durch den das Licht zuerst hindurchgeht, als Polarisator, weil er das Licht polarisiert, den zweiten als Analysator, weil er das polarisierte Licht erkennen läßt. Denn dreht man den zweiten Nicol aus der parallelen Lage in die gekreuzte, so wird das durchgelassene Licht allmählich schwächer bis zum Verschwinden, und umgekehrt ist eine solche Änderung der Stärke des Lichtes beim Drehen eines Nicols das Zeichen dafür, daß das ankommende Licht polarisiert war.

Gerade an solchem polarisierten Licht hat nun Faraday seine wunderbare Entdeckung gemacht, und deswegen mußte die Polarisation des Lichtes hier kurz erörtert werden. Die Frage, die er sich stellte, war, ob das Licht in der Nähe eines Magneten irgend eine Beeinflussung erfahre, und sein Experiment lehrte, daß zwar nicht das natürliche Licht, wohl aber das polarisierte eine solche Beeinflussung wirklich erfuhr. Wenn man zwei entgegengesetzte Magnetpole einander nahe gegenüberstellt, so daß zwischen ihnen ein starkes magnetisches Feld entsteht, so sind in diesem Feld offenbar zwei Richtungen besonders ausgezeichnet, nämlich erstens die Richtung der Kraftlinien, die in der Verbindungslinie des Nordpols und Südpols laufen, und zweitens die Richtung senkrecht zu den Kraftlinien. Man hat also auch für einen Lichtstrahl die beiden Hauptfälle, daß man ihn entweder in der Richtung der Kraftlinien durch das Feld schickt oder senkrecht zu dieser Richtung, und die Entdeckung von Faraday zeigte, daß im ersten Fall, aber nur in diesem, eine Beeinflussung von polarisiertem Licht durch den Magneten stattfindet.

Um einen Lichtstrahl bequem in der Richtung der Kraftlinien durch ein magnetisches Feld zu senden, wendet man vorteilhaft das Mittel an, daß man die Pole des Magneten durchbohrt, so daß das Licht durch die Bohrung geschickt werden kann. Sehr bequem ist daher der Elektromagnet, den wir auf S. 162, Fig. 144 abgebildet haben. In Fig. 317 sieht

man einen solchen Elektromagneten, dessen beide Pole M M einander nahe gerückt sind, um ein starkes Feld zwischen sich entstehen zu lassen und die durch die ganze Länge eine Bohrung besitzen. Wir setzen zwischen die Pole ein Stück Glas G mit ebenen Seitenwänden und bringen auf beide Seiten des Elektromagneten je ein Nicolsches Prisma, vorn einen Polarisator P, hinten einen Analysator A. Wenn wir nun den Polarisator etwa vertikal stellen und den Analysator horizontal, also gekreuzt, und, solange der Magnet nicht erregt ist, Licht von einer Natriumlampe L durch die Nicols und das Glas G senden, so wissen wir ja, daß kein Licht durch den Analysator hindurchgeht, weil er eben gekreuzt steht. Sehen wir durch den Analysator nach

Fig. 317.



der Lampe hin, so haben wir ein dunkles Gesichtsfeld. Wenn wir nun aber den Magneten erregen, indem wir seinen Strom schließen, ohne sonst etwas zu ändern, so finden wir zu unserer Überraschung, daß das Feld sich aufhellt, daß wir jetzt die Lampe L sehen. Das war die Entdeckung von Faraday, und Faraday war gewiß ebenso überrascht über diese Erscheinung, obwohl er etwas Derartiges suchte. Also die gekreuzten Nicols bringen jetzt nicht mehr Dunkelheit hervor. Um wieder Dunkelheit zu erzeugen, müssen wir den Nicol aus der gekreuzten Stellung herausdrehen, bei diesem Versuch etwa um 15°, wie es die Stellung von A in der Figur zeigt. Dann erhalten wir wieder Dunkelheit. Da unser Analysator dasjenige Licht nicht hindurchläßt, dessen Polarisationsebene senkrecht zu der seinigen ist, so sieht man, daß das an ihn ankommende Licht, nachdem es das Glas durchsetzt hat, nicht mehr die vertikale Polarisationsebene behalten haben kann, die durch den ersten Nicol erzeugt worden ist, sondern daß seine Polarisationsebene in dem Glas um etwa 15° gedreht worden sein muß. Und das ist daher der kurze Ausdruck der Erfahrungstatsache, ohne jede Hypothese: In dem magnetischen Feld wird die Polarisationsebene

des Lichtes, welches sich in der Richtung der magnetischen Kraftlinien fortpflanzt, gedreht. Wie groß der Drehungswinkel ist, das hängt erstens von der Stärke des Magnetfeldes und zweitens von der Natur und der Dicke des Körpers ab, der im magnetischen Feld sich befindet; Glas, Wasser, Petroleum, Schwefelkohlenstoff bringen jedes pro Zentimeter Dicke im magnetischen Feld eine Drehung von bestimmter Größe hervor. Je stärker das Magnetfeld ist, um so größer ist unter sonst gleichen Umständen die Drehung.

Was den Sinn der Drehung betrifft, nämlich ob die Drehung im Sinne des Uhrzeigers oder entgegengesetzt geschieht, so hat schon Faraday das sehr einfache und schöne Gesetz dafür gefunden. Denkt man sich die magnetischen Kraftlinien von Ampèreschen Molekularströmen umgeben (S. 204), so ist die Richtung der Drehung immer gleich der Richtung der Molekularströme. Es kommt also gar nicht darauf an, ob der Lichtstrahl vom Nordpol zum Südpol sich fortpflanzt, oder umgekehrt vom Südpol zum Nordpol, der Sinn der Drehung ist beide Male derselbe. Daraus folgt, daß wenn man es so einrichtet, daß der Lichtstrahl, nachdem er das Glas durchlaufen hat, reflektiert wird und dann das Glas im umgekehrten Sinne durchläuft, daß dann die Drehung im ganzen verdoppelt wird.

Diese prachtvolle Entdeckung von Faraday zeigte also unzweideutig, daß eine Beeinflussung des Lichtes durch magnetische Kräfte tatsächlich stattfindet. Immerhin aber geht diese Beeinflussung hier unter scheinbar sehr komplizierten Umständen in komplizierter Weise vor sich. Man muß erstens polarisiertes Licht haben, zweitens dieses in Richtung der Kraftlinien durch das Magnetfeld senden und findet dann, daß das Licht an sich nicht beeinflußt wird, sondern nur seine Polarisationsebene gedreht wird. Aber alle Versuche, die man machte, eine weitere, vielleicht einfachere Wechselwirkung zwischen Licht und Magnetismus oder Elektrizität zu finden, blieben fast fünfzig Jahre lang ohne Erfolg. Die Faradaysche Erscheinung war und blieb die einzige. Man konnte sie mit Recht so auffassen, daß man sagte, in einem Magnetfeld geht jedenfalls etwas vor, welches die Natur einer Drehung, nicht die einer Verschiebung hat. Aber man hätte dann auch erwarten dürfen, daß Licht, welches senkrecht zu den Kraftlinien durch ein Magnetfeld geht, irgendwie beeinflußt wird. Doch alle, auf die verschiedenfachsten und zum Teil sehr genialen Weisen unternommenen Versuche, dies zu finden, gaben stets nur negative Resultate.

Erst vor wenigen Jahren gelang es einem Holländer Professor Zeeman, eine weitere, hochinteressante Wirkung des Magnetismus auf das Licht zu finden. Schon Faraday hatte versucht, ob nicht bei Flammen, die ja selbst das Licht aussenden, ob nicht bei diesen die Strahlung durch den Magnetismus beeinflußt wird. Es wäre ja offenbar möglich, daß die Schwingungen der Moleküle einer Flamme, durch die das Licht erst erzeugt wird, durch den Magnetismus modifiziert würden. Faraday hatte bei diesen Versuchen keinen Erfolg, aber Zeeman, der mit größeren und feineren Hilfsmitteln arbeiten konnte, fand in dieser Richtung tatsächlich eine neue Erscheinung, die man das Zeemansche Phänomen nennt. Man kann bekanntlich Flammen herstellen, welche

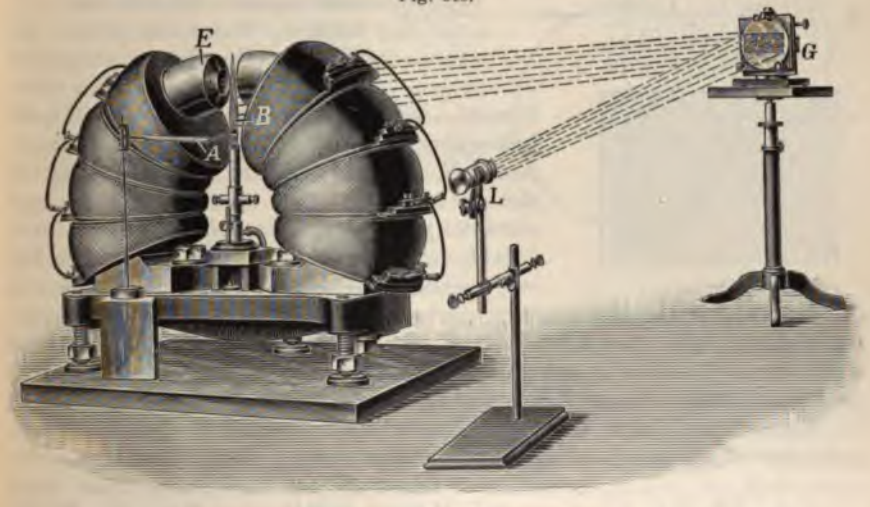
nur Licht von einer einzigen bestimmten Farbe aussenden, sogenannte monochromatische Flammen. Bringt man in eine gewöhnliche nichtleuchtende Gasflamme etwas Natriumsalz (Kochsalz), so leuchtet die Flamme gelb und sendet Licht von einer ganz bestimmten Schwingungsdauer und Wellenlänge aus. Ebenso, wenn man ein Lithiumsalz in die Flamme bringt, erhält man ein rotes Licht von ganz bestimmter Wellenlänge und Farbe, bei Thalliumsalz ein grünes u. s. f. So kann man einfach Flammen herstellen, die Licht von einer oder von einigen wenigen verschiedenen Farben aussenden. Wenn man das Licht einer solchen Flamme mittels einer Linse durch ein Prisma sendet, so erhält man eine oder mehrere ganz scharfe Linien an bestimmten Stellen. Besser benutzt man statt eines Prismas ein sogenanntes Beugungsgitter, auf welches man das Licht der Flamme durch eine Linse wirft. Man erhält dann im reflektierten Licht sehr scharfe Linien an bestimmten Stellen, die durch die Schwingungsdauer des Lichtes bestimmt sind. Ein Beugungsgitter anzuwenden hat den Vorzug vor der Benutzung eines Prismas, daß man dadurch nahe bei einander stehende Linien noch deutlich trennen kann. Zum Beispiel zeigt es sich, daß die gelbe Natriumflamme nicht Licht von einer einzigen bestimmten Schwingungsdauer aussendet, sondern von zwei wenig verschiedenen Schwingungsdauern. Man sieht daher auch, wenn man auf ein solches Beugungsgitter das Licht einer Natriumflamme wirft und in passender Richtung durch ein Fernrohr oder eine Lupe das Gitter beobachtet, zwei nahe bei einander befindliche gelbe Linien, die man die D-Linien nennt. Soweit ist alles aus der Optik bekannt und bietet nichts Neues. Nun aber brachte Zeeman die Natriumflamme, die das Licht aussendet, zwischen die Pole eines starken Elektromagneten und hierbei sah er, daß jede einzelne Linie sich in drei Linien zerteilt, wenn das Licht, das senkrecht zu den Kraftlinien austritt, beobachtet wird. Um die Anordnung des Versuchs zu zeigen, ist derselbe in Fig. 318, so gut es geht, dargestellt. Man sieht den Halbringelektromagneten mit abgerundeten Polen, den wir schon auf S. 162 beschrieben haben. Zwischen den Polen befindet sich ein gewöhnlicher Bunsenbrenner B. In diesen taucht ein Stück Platindraht A, der mit Natriumsalz getränkt ist. Das Licht geht durch einen engen Spalt hindurch und wird senkrecht zu den Kraftlinien des Magnets durch eine Linse auf ein (Rowlandsches) Beugungsgitter G geworfen. Durch ein Fernrohr L beobachtet man das Gitter in bestimmter Richtung und sieht dann die beiden D-Linien des Natriums. Sobald man aber den Elektromagneten erregt, findet man, daß jede der beiden Natriumlinien in drei nahe bei einander befindliche Linien zerfällt. Es bildet sich aus jeder einzelnen Linie ein sogenanntes Triplet. Das ist eines der neuen Phänomene, die Zeeman entdeckt hat. Wie man sieht, handelt es sich um Licht, welches in dem Magnetfeld entsteht und welches senkrecht zu den Kraftlinien des Magneten nach außen geht. Macht man denselben Versuch, indem man dasjenige Licht beobachtet, welches von der Flamme in der Richtung der Kraftlinien nach außen geht (zu dem Zwecke sind Durchbohrungen in den Eisenkernen des Halbringelektromagnets angebracht), so findet man, daß jede Linie verdoppelt wird, aus einer

Linie entsteht ein sogenanntes Doublet. Das ist das zweite, mit dem ersten zusammenhängende Phänomen, das von Zeeman gefunden wurde.

Um diese beiden Erscheinungen zusammenzufassen, kann man sagen, durch den Magnetismus wird die Schwingungsdauer der leuchtenden Teile in der Flamme beeinflußt. Denn jeder bestimmten Linie, die man von dem Gitter erhält, entspricht eine bestimmte Schwingungsdauer. Wird also eine Linie in drei gespalten, die eng bei einander, aber doch getrennt sind, so heißt das, es ist durch den Magnetismus außer dem ursprünglichen Licht noch Licht von etwas geänderter Schwingungsdauer entstanden, und zwar einerseits solches, welches etwas größere, andererseits solches, welches etwas kleinere Schwingungsdauer hat als das ursprüngliche.

Eine Erklärung dieser höchst merkwürdigen Erscheinung hat Zeeman auf Grund der Elektronentheorie gegeben. Das eigentliche Leuchtende in

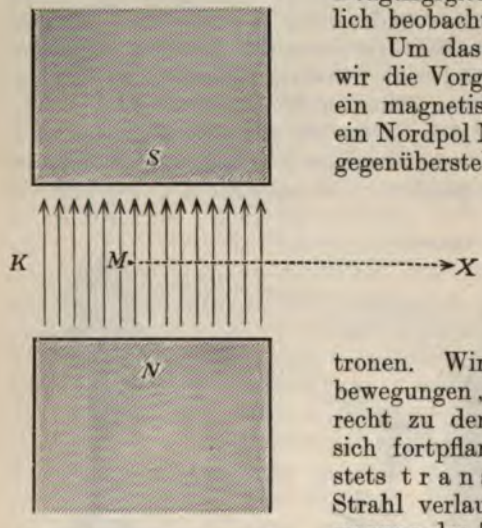
Fig. 318.



einer Flamme sind, wie er annimmt, nicht schwingende Moleküle, wie man früher meinte, sondern schwingende Elektronen. Denn da der Äther elektrische Wellen fortpflanzt, so muß er auch durch elektrische Bewegungen angeregt werden, und solche Bewegungen sind eben die der Elektronen, die in der Flamme vielleicht frei, vielleicht mit Materie verbunden (als Ionen) vorhanden sind. Wenn nun eine solche Flamme mit nach allen Richtungen schwingenden Elektronen in ein magnetisches Feld gebracht wird, so beeinflußt dieses Feld die Bewegung jedes einzelnen Elektrons in der Weise, daß es ihm noch einen Bewegungsantrieb senkrecht zu den Kraftlinien und senkrecht zu seiner schon vorhandenen Bewegung erteilt. Wir wissen dies aus der Linken-Hand-Regel, die auf S. 181 angeführt war. Daraus folgt, daß die Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen in der Richtung senkrecht zu den Kraftlinien zum Teil vergrößert, zum Teil verkleinert werden müssen. Unter vielen nach allen Richtungen sich bewegenden Teilen werden also solche sein, deren ursprüngliche Geschwindigkeit unverändert bleibt, dann solche, deren Geschwindigkeit um einen

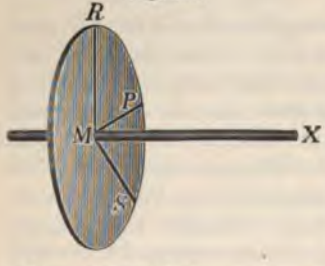
gewissen Betrag vergrößert und wieder solche, deren Geschwindigkeit um denselben Betrag verkleinert ist. Im Äther werden daher in der Richtung senkrecht zu den Kraftlinien Schwingungen von drei verschiedenen, aber nahe bei einander liegenden Schwingungszahlen verlaufen, und diese Schwingungen werden durch ein Prisma oder Beugungsgitter getrennt und geben das wirklich beobachtete Zeemansche Triplet.

Fig. 319.



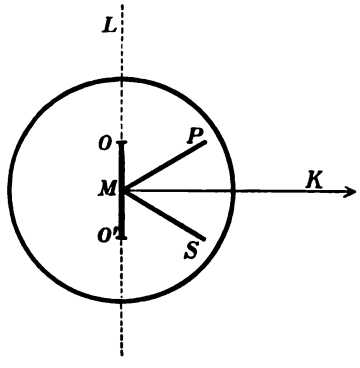
Um das deutlich einzusehen, betrachten wir die Vorgänge genauer. Es sei in Fig. 319 ein magnetisches Feld dadurch gegeben, daß ein Nordpol N und ein Südpol S sich einander gegenüberstehen. Die Kraftlinien dieses Feldes haben die Richtung der großen Pfeile. In dem Felde seien schwingende Elektronen vorhanden, die zunächst in beliebiger Bewegung begriffen seien. M sei eines dieser Elektronen. Wir untersuchen diejenigen Lichtbewegungen, die in der Richtung X (senkrecht zu den Kraftlinien) durch den Äther sich fortpflanzen. Da die Lichtbewegungen stets transversal sind, senkrecht zum Strahl verlaufen (S. 277), so kann eine Bewegung des Teilchens M in der Richtung von X selbst keine Lichtbewegung nach dieser Richtung hin veranlassen, denn eine solche wäre longitudinal. Es kommen also, solange das Feld nicht erregt ist, nur diejenigen Bewegungen von M in Betracht, die in einer zur Ebene unserer Zeichnung senkrecht stehenden Ebene verlaufen. In Fig. 320 ist eine Ebene senkrecht zum Strahl X perspektivisch gezeichnet. Es kommen also nur Schwingungen von M in Betracht, die in dieser Ebene stattfinden, also etwa nach MP oder MR oder MS. Die Kraftlinien des Feldes liegen in dieser Ebene in einer bestimmten Richtung. Die ganze Bewegung eines Teilchens M hat eine Komponente in der Richtung X, die für uns jetzt nicht in Betracht kommt, und eine Komponente in der Ebene, die wir betrachten. Es sei also in Fig. 321 diese Ebene in der Papierebene gezeichnet. Senkrecht zur Papierebene, also nach oben oder unten gehen die Lichtbewegungen in der Richtung X hinaus. In der Papierebene sei durch den Pfeil K die Richtung der Kraftlinien angegeben, MP oder MS seien zwei beliebige, momentane Geschwindigkeiten des Teilchens M. Wenn nun das magnetische Feld erregt wird, so wird unser bewegtes Elektron von Kräften angegriffen und wird eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen. Diese Zusatzgeschwindigkeit ist senkrecht zu den Kraftlinien und senkrecht zu der vorhandenen Bewegung. Daraus

Fig. 320.



sieht man, daß für diejenige Komponente der Bewegung, die in unserer Ebene liegt, z. B. M P, die magnetische Kraft keinen Einfluß hat. Denn da die Kraft senkrecht auf M P und senkrecht auf der Kraftlinie steht, so steht sie senkrecht auf der Papierebene, hat also die Richtung von X und würde also longitudinale Bewegungen erzeugen, welche im Äther nicht vorkommen. Wir müssen also gerade die vorher vernachlässigte Bewegung in der Richtung X ins Auge fassen. Eine Bewegung der Teilchen in der Richtung von X wird durch das Magnetfeld beeinflußt, und zwar bekommt ein Teilchen eine Geschwindigkeitszunahme senkrecht zu X und senkrecht zu den Kraftlinien (nach der Linken-Hand-Regel), also in Fig. 321 in der Richtung M O oder MO', je nachdem das Teilchen sich in der Richtung X, die senkrecht zur Zeichnung der Fig. 321 ist, gerade nach oben oder unten bewegt.

Fig. 321.



Das Resultat dieser Betrachtungen ist, daß in der Fig. 321 diejenigen Komponenten der ganzen Geschwindigkeit, welche in der Richtung MK liegen, unverändert bleiben, daß dagegen die Komponenten in der Richtung M L eine Vergrößerung oder Verkleinerung um M O resp. M O' erhalten. Es sind also in den wirksamen Richtungen, d. h. in denjenigen Richtungen, durch welche Ätherbewegungen nach X veranlaßt werden, drei verschiedene Geschwindigkeiten vorhanden: eine unveränderte von Teilchen, welche nach M K (also in der Richtung der Kraftlinien) schwingen, und eine vergrößerte und eine um ebensoviel verkleinerte nach der Richtung M L (senkrecht zu den Kraftlinien). Daher muß also bei der Brechung oder Beugung das Zeemansche Triplet entstehen.

Aber man sieht noch mehr aus dieser Betrachtung. Die mittelste Linie des Zeemanschen Triplets kommt von Schwingungen der Elektronen her, die in der Richtung M K verlaufen, die beiden äußeren von Schwingungen, die in der Richtung M L verlaufen. Lichtbewegungen aber, bei denen alle Teilchen eines Strahles in derselben Richtung schwingen, haben wir oben (S. 326) als polarisierte bezeichnet. Es folgt also:

Das Licht in den drei Linien des Zeemanschen Triplets ist polarisiert. Und noch mehr. Diejenige Ebene, welche durch den Strahl geht und senkrecht zu den Lichtschwingungen steht, nennen wir ja die Polarisationsebene (S. 327). Die Lichtbewegungen also, welche durch M K veranlaßt werden, und die die mittlere Linie des Triplets erzeugen, haben eine Polarisationsebene, welche senkrecht zu den Kraftlinien steht, die Lichtbewegungen, welche durch M L veranlaßt werden, eine solche, welche die Kraftlinien umfaßt. Wir haben daher die weitere Folgerung:

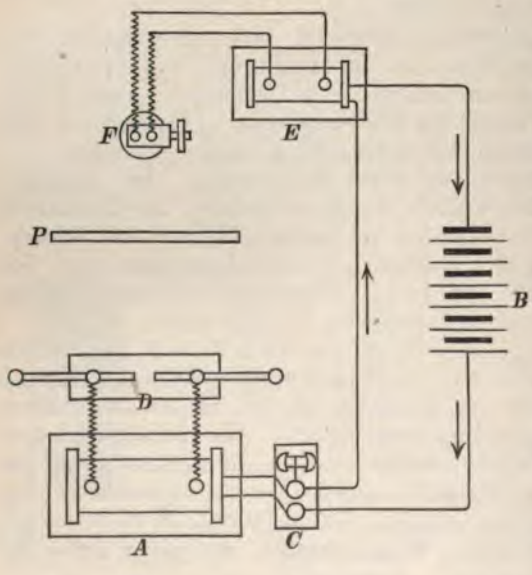
Die mittlere Linie des Zeemanschen Triplets ist senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien polarisiert, die beiden äußeren Linien sind parallel den Kraftlinien polarisiert.

Dieses Resultat unserer Betrachtung ist nun durch die Erfahrung vollständig bestätigt und es bildet das umgekehrt eine ausgezeichnete Probe auf unsere Anschauung, nach der es die in der Flamme schwingenden Elektronen sind, welche die Lichtbewegungen hervorrufen. Man kann sogar noch weiter aus der Größe der Geschwindigkeitsänderung, welche das magnetische Feld hervorbringt, das Verhältnis der Ladung eines schwingenden Elektrons zu seiner Masse berechnen und findet dasselbe Verhältnis wie bei den Kathodenstrahlen, woraus man schließen muß, daß es die negativen Elektronen sind, welche in den Flammen die betrachteten Schwingungen ausführen.

Das Zeemansche Doublet in der Richtung der Kraftlinien und seine Polarisationsverhältnisse erklären sich in ganz entsprechender Weise, doch wollen wir darauf nicht eingehen.

Während wir bei der Faradayschen und Zeemanschen Entdeckung Einwirkungen des Magnetismus auf Lichterscheinungen gefunden haben, sind umgekehrt auch Einwirkungen des Lichts auf elektrische Erscheinungen entdeckt worden, und diese bilden einen weiteren interessanten Zusammenhang zwischen optischen und elektrischen Vorgängen. Daß der Widerstand des Selens, wie wir oben S. 84 besprochen haben, durch Beleuchtung herabgesetzt wird, ist schon eine Einwirkung des Lichts auf elektrische Vorgänge. Aber diese Einwirkung ist hier eine indirekte. Es wird nämlich das Selen im Licht chemisch verändert, ähnlich wie eine photographische Platte, es entstehen Modifikationen des Selens, und diese haben eine andere spezifische Leitungsfähigkeit. Von solchen indirekten Einwirkungen des Lichts wollen wir aber hier nicht sprechen, sondern von direkten.

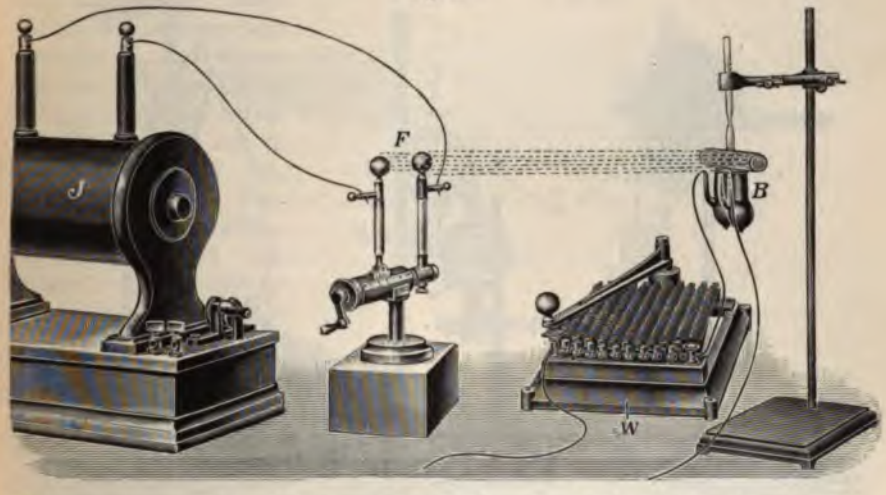
Fig. 322.



Eine direkte elektrische Wirkung des Lichts wurde von Hertz im Anfang seiner Versuche über rasche elektrische Schwingungen, welche zu so wichtigen Resultaten geführt haben, entdeckt. Wenn er von zwei Induktionsapparaten gleichzeitig Funken erzeugen ließ, so fiel ihm auf, daß diese sich unter Umständen gegenseitig beeinflussen. Um diese Erscheinung deutlich zu machen, benutzte er eine Anordnung, wie sie in Fig. 322 dargestellt ist. Ein größerer Induktionsapparat A und ein kleinerer E wurden so aufgestellt, daß die Funken des ersten bei D zwischen zwei zusammenschiebbaren

Metallstangen übersprangen, während die des zweiten zwischen den verschiebbaren Kugeln eines Funkenmikrometers F (S. 283) übersprangen. Die primären Rollen beider Induktionsapparate wurden von demselben Strom betrieben, der durch einen besonderen Unterbrecher C geöffnet und geschlossen wurde. Der primäre Strom ging von einer Batterie B durch den Unterbrecher C zur primären Rolle von A, dann zur primären Rolle von E und zur Batterie zurück. Wenn man nun die Stangen in D und die Kugeln in F so weit auseinanderschob, daß in beiden Apparaten noch gerade ein regelmäßiger Funkenübergang stattfand (wobei die Funken in D etwa 10 mm, die in F etwa 2 mm lang waren), so hörten beide Funkenübergänge sofort auf, wenn man zwischen D und F eine Platte aus Metall oder Glas oder Holz oder Kautschuk oder Papier oder

Fig. 323.



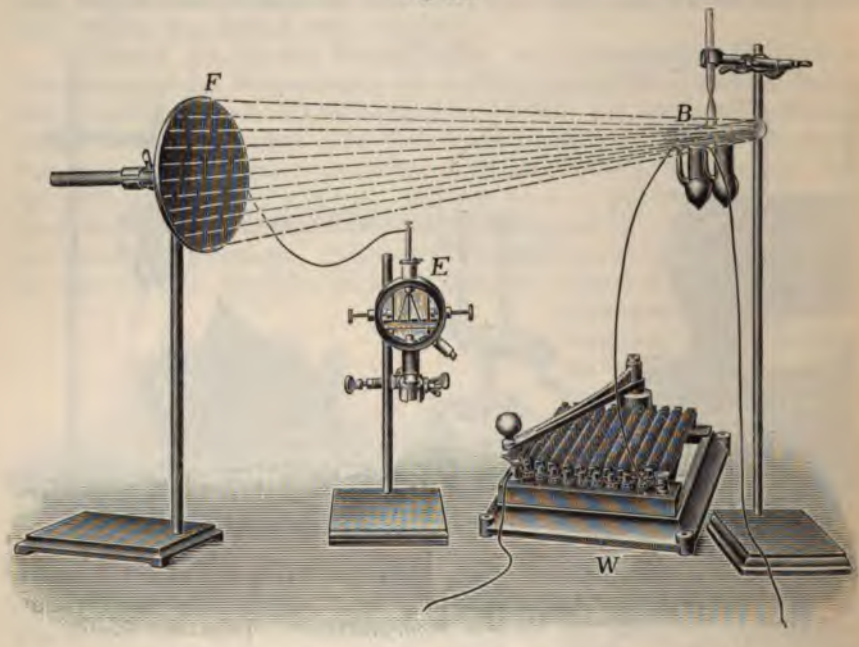
Glimmer u. s. w. einschaltete. Hertz erkannte bald, daß es das Licht, das von den Funkenstrecken ausgeht, ist, welches diese Erscheinung verursacht. In jeder der beiden Funkenstrecken geht die Entladung leichter vor sich, wenn sie von dem Licht der anderen beleuchtet ist. Eine dazwischen gestellte Platte aus einem Stoff, welcher das Licht abhält, läßt auch die Funken erlöschen. Aber nicht alles Licht ist wirksam, sondern nur das Licht von sehr kurzer Wellenlänge, das ultraviolette Licht. Deshalb verhalten sich Glas und Glimmer wie undurchsichtige Körper, sie absorbieren nämlich das ultraviolette Licht. Dagegen andere Körper, wie Gips (Marienglas), Bergkristall, Wasser, welche ultraviolettes Licht durchlassen, lassen auch diese Wirkung durch sich hindurch.

Daß in der Tat nur das ultraviolette Licht das Wirksame bei diesem Versuch ist, nicht etwa sonstige Eigenschaften des Funkens, wurde von Hertz unzweifelhaft dadurch bewiesen, daß er an Stelle der einen Funkenstrecke einfach eine Bogenlampe stellte. Man kann das sehr bequem zeigen, wenn man eine Quecksilberbogenlampe aus Quarzglas (S. 118) anwendet. Diese sendet viel ultraviolettes Licht aus. Wenn man

also, wie in Fig. 323, einen Induktionsapparat J mit einem Funkenmikrometer F verbindet und die Kugeln desselben so weit auszieht, daß gerade kein regelmäßiger Funkenübergang zwischen ihnen stattfindet, so erhält man sofort einen ordentlichen und kräftigen Funkenstrom, sobald man das Licht der Quecksilberbogenlampe B (zu der man einen Strom durch den Widerstand W sendet) auf die Funkenstrecke fallen läßt. Das Licht der Bogenlampe enthält viel mehr ultraviolettes Licht als das Tageslicht, und ist für diese Versuche viel wirksamer als Sonnenlicht.

Die Tatsache dieser Einwirkung des Lichtes auf die elektrische Entladung war damit in einfachster Weise konstatiert, aber was die Ursache

Fig. 324.

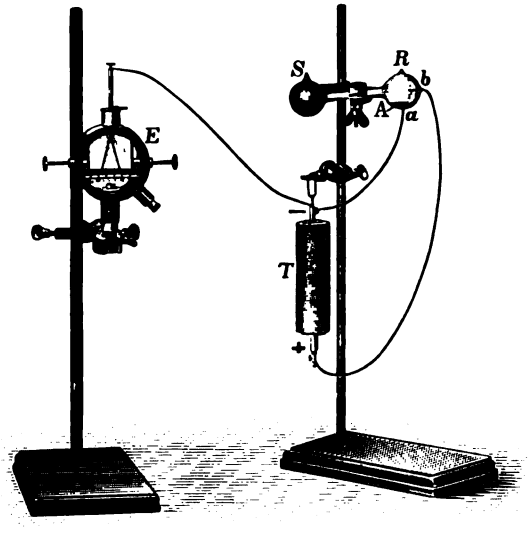


derselben ist, blieb zunächst unbekannt. Eine Aufklärung erhielten diese Experimente erst durch Versuche von Hallwachs, welcher zeigte, daß negativ geladene Körper durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ihre negative Elektrizität verlieren. Man kann diesen Versuch in einfacher Weise so anstellen, wie es Fig. 324 zeigt. Man stellt eine blank geputzte Zinkplatte F, die mit einem wohl isolierenden Griff versehen ist, auf, verbindet sie mit einem Goldblattelektroskop E und ladet sie durch eine geriebene Ebonitstange negativ elektrisch. Das Elektroskop gibt durch seinen Ausschlag die Spannung an, die, wenn alles gut isoliert ist, sich konstant hält. Sobald man aber von einer Bogenlampe B, wieder am besten von einer Quecksilberbogenlampe aus Quarzglas, Licht auf die Platte wirft, so gehen die Blättchen des Elektroskops rasch zurück, die Platte wird entladen.

Man bezeichnet diese Erscheinung als lichtelektrische oder auch

als aktinoelektrische Wirkung. Ist die Platte F positiv geladen, so wird sie durch das Licht nicht entladen. Ist aber die Platte F ungeladen, und läßt man Licht auf sie fallen, so wird sie schwach positiv elektrisch. Diese Versuche sagen direkt aus, daß bei der Bestrahlung mit ultraviolettem Licht negative Elektrizität von den Metallen entweicht. Sie sind infolgedessen ganz ähnlicher Natur, und in Wirklichkeit schon vorher bekannt gewesen, wie die Versuche, durch welche die Entladung der Körper unter dem Einfluß von Röntgenstrahlen (S. 307) oder radioaktiven Substanzen (S. 314) bewiesen wird. Indes spielt hier bei den aktinoelektrischen Wirkungen die Natur des Stoffes, auf welchen das Licht fällt, eine Rolle. Nicht alle Metalle zeigen diese Wirkung gleich gut. Unter den bekannteren Metallen ist Zink das geeignetste, besser aber gelingen die Versuche noch mit den Amalgamen des Kaliums und Natriums. Bei diesen braucht man nicht eine so starke Quelle ultravioletten Lichts, wie es eine Bogenlampe ist, sondern kann die Versuche schon im gewöhnlichen Tageslicht anstellen. Eine hübsche und bequeme Anordnung dafür zeigt Fig. 325. Nach dem Vorschlag von Elster und Geitel, welche die große Wirksamkeit des Natriumamalgams gefunden haben, werden Röhren in den Handel gebracht, wie die mit R bezeichnete, welche zwei eingeschmolzene Elektroden besitzen, a und b. In der Röhre ist das flüssige Amalgam, welches durch Neigen der Röhre entweder in die geschwärzte Kugel S oder in die durchsichtige Kugel R gebracht werden kann. Zu dem Versuch wird es in die helle Kugel R gebracht, so daß es die Elektrode a bedeckt. Durch eine sogenannte Trockensäule T (die in Wirklichkeit eine feuchte Säule ist, bestehend aus Gold- und Silberpapierblättern mit je dazwischenliegenden luftfeuchten Papierblättern) wird das Amalgam negativ geladen, indem der negative Pol der Säule mit der Elektrode a verbunden wird, und zugleich ist mit dem Amalgam ein Exnersches Goldblattelektroskop E (S. 18) in Verbindung gesetzt, so daß dieses die Ladung durch den Ausschlag der Goldblättchen anzeigt. Den positiven Pol der Batterie kann man mit der anderen Elektrode b in Verbindung bringen. Die Röhre ist im übrigen ziemlich luftleer gemacht. Sowie nun Tageslicht auf das Amalgam fällt, fallen die Blättchen des Elektroskops zusammen, wird das Tageslicht abgeblendet, so spreizen sich die Blättchen wieder auseinander.

Fig. 325.



Es findet hierbei, wie gesagt, ein direkter Fortgang von negativen Elektronen von der bestrahlten Fläche statt. Wenn die Fläche sich in einem möglichst luftleeren Raum befindet, so gehen diese Elektronen geradlinig durch den Gasraum hindurch und bilden Kathodenstrahlen, deren Wirkungen zwar nicht so kräftig sind wie die der gewöhnlichen, die aber auch genau dieselben Eigenschaften haben und dieselben Gesetze befolgen wie diese.

Es besteht also ein Unterschied zwischen der Entladung durch ultraviolettes Licht und der durch Röntgenstrahlen und Becquerelstrahlen. Bei den letzteren besteht die Wirkung primär in einer Ionisierung des Gases (oben S. 307) und dadurch entladen sich dann geladene Körper. Bei der ersteren aber besteht die primäre Wirkung in der Fortschnellung der negativen Elektronen, die unter Umständen dann auch sekundär das Gas ionisieren können. Daher werden durch ultraviolette Strahlen nur negative Ladungen zerstreut, durch die beiden anderen Mittel aber sowohl positive wie negative.

Es ist nicht wahrscheinlich, daß mit den in diesem Kapitel erwähnten Tatsachen die Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus einerseits und zwischen dem Licht andererseits erschöpft sind. Vorläufig nur sind bloß die angeführten Tatsachen zu unserer Kenntnis gekommen. Durch Verfeinerung der Hilfsmittel werden wahrscheinlich noch weitere Beziehungen, die man zum Teil nach unseren bisherigen Kenntnissen voraussehen kann, ohne daß sie sich bisher wirklich beobachten ließen, entdeckt werden. Und vielleicht wird in späteren Jahren gerade dieser Zusammenhang zwischen Elektrizität und Licht das allergrößte Interesse bieten.

15. Kapitel.

Die elektrischen Maßeinheiten.

In zweifacher Weise dringt die Physik immer weiter in die Geheimnisse der Natur ein. Der erste Schritt besteht in der qualitativen Erforschung neuer Erscheinungen, neuer, bisher verborgener Kräfte und neuer Wirkungen vorhandener Kräfte, der zweite ist die quantitative, messende Feststellung ihrer Gesetze, die zahlen- und formelmäßige Untersuchung der Abhängigkeit der verschiedenen physikalischen Erscheinungen voneinander. Die Entdeckung der Induktionserscheinungen durch Faraday z. B. war der erste Schritt zu der Erweiterung unserer Kenntnisse auf diesem Gebiet; die gesetzmäßige Feststellung der Abhängigkeit des induzierten Stromes von Stärke, Richtung, Form und relativer Geschwindigkeit des induzierenden war der zweite, nicht minder wichtige und folgenreiche Schritt.

Die Messung einer jeden physikalischen Größe kann zuerst nach einem ganz beliebigen Maß geschehen, sobald dieses Maß nur ein sicher definiertes ist. Wir können Stromstärken nach Kubikmillimetern Knallgas messen oder nach Grammen Kupfer, wir können elektromotorische Kräfte nach Daniell messen oder nach Ausschlägen der Elektrometernadel u. s. w. Die neuere Physik aber hat mit immer größerer Schärfe und Deutlichkeit den Zusammenhang eruiert, der zwischen den verschiedenen Gebieten der Physik herrscht, sie hat in immer weiterem Umfang die qualitative und quantitative Umwandlungsfähigkeit der verschiedenen Formen der Energie, die als mechanische Energie, als Wärmeenergie, als elektrische oder als chemische Energie auftritt, ineinander gezeigt. Dieser Zusammenhang der aus verschiedenen physikalischen Gebieten entnommenen Größen wies nun auf die Möglichkeit und Notwendigkeit hin, auch zu ihrer Messung Maße anzuwenden, welche nicht mehr willkürlich sind, sondern miteinander in Beziehung stehen. Es ergab sich die Möglichkeit, alle physikalischen Größen in Einheiten auszudrücken, welche von einigen Grundeinheiten in bestimmter Weise abgeleitet sind. Gauß und Wilhelm Weber waren es, welche zuerst ein solches System von Einheiten aufstellten und durchführten, und dieses System nennt man das absolute Maßsystem.

Die praktische Messung aller physikalischen Größen, zu welchem Erscheinungsgebiet sie auch gehören, führt nämlich stets zurück auf Messung von Längen, Zeiten und Massen. Dies sind die einzigen Operationen, welche in verschiedener Form bei jeder praktischen Messung allein vorkommen. Es werden sich also auch die Zahlenwerte sämtlicher physikalischen Größen in eindeutiger, unveränderlicher, bestimmter Weise ergeben, falls man nur für diese drei Größen bestimmte Einheiten festsetzt. Diese Erwägung führt dazu, die Einheiten der Länge, Masse

und Zeit als Grundeinheiten für das absolute Maßsystem zu verwenden, und zwar wird in wissenschaftlichen Messungen als Einheit der Länge stets das Zentimeter, als Einheit der Zeit die Sekunde, als Einheit der Masse das Gramm angenommen. Das Zentimeter ist definiert als der hundertste Teil der Länge eines in Paris aufbewahrten Meterstabes. Das Gramm ist definiert als der tausendste Teil der Masse eines Stückes Platiniridium, welches in Paris als „*Kilogramme des archives*" aufbewahrt wird. Die Sekunde als $\frac{1}{86\,400}$ des mittleren Sonnentages. Von dem Meterstab sowohl wie von dem Kilogramm sind in den meisten Kulturstaaten genaue Kopieen vorhanden, die amtlich aufbewahrt werden.

Das absolute System, bei welchem Zentimeter, Gramm und Sekunde als Grundeinheiten gewählt sind, nennt und schreibt man das „C. G. S.-System".

Von den drei Grundeinheiten lassen sich nun für alle physikalischen Größen Einheiten ableiten, die man deswegen abgeleitete Einheiten nennt. Wir beginnen mit einigen räumlichen und mechanischen Größen.

1. Fläche. Als Maß für eine Fläche gilt ein Quadrat von beliebiger Seitenlänge.

Um bei unseren Einheiten zu bleiben, nehmen wir als Seitenlänge 1 cm und haben also als absolute Einheit der Fläche im C.G.S.-System 1 qcm. Diese Flächeneinheit ist daher bereits eine abgeleitete Einheit.

2. Volumen. Als Maß für ein Volumen gilt ein Würfel von beliebiger Seitenlänge. Die absolute Einheit des Volumens ist also der Würfel, dessen Seitenlänge die Längeneinheit ist. Im C.G.S.-System ist daher die Volumeneinheit 1 ccm.

Ein Volumen von 3 cbm ist daher im C.G.S.-System auszudrücken durch die Zahl 3 Millionen (Benennung: Kubikzentimeter).

Je kleiner die Einheit ist, desto größer ist die Zahl, durch welche eine bestimmte Größe in dieser Einheit ausgedrückt wird.

3. Geschwindigkeit. Als Geschwindigkeit eines sich gleichförmig bewegenden Körpers definiert man das Verhältnis des von ihm zurückgelegten Weges zu der Zeit, welche er zur Zurücklegung braucht.

Als absolute Einheit der Geschwindigkeit nehmen wir also diejenige an, bei welcher die Längeneinheit in der Zeiteinheit durchlaufen wird. Die Einheit der Geschwindigkeit ist also im C.G.S.-System diejenige, bei welcher 1 cm in 1 Sekunde durchlaufen wird.

4. Beschleunigung. Unter der Beschleunigung eines Körpers versteht man das Verhältnis seiner Geschwindigkeitszunahme zu der Zeit, in welcher er diese Zunahme erlangt.

Die absolute Einheit der Beschleunigung ist also diejenige, bei der die Geschwindigkeit eines Körpers in der Zeiteinheit (1 Sekunde) sich um die Geschwindigkeitseinheit (1 cm pro Sekunde) erhöht.

5. Kraft. Unter der Kraft, welche auf eine Masse wirkt, versteht man nach der Definition der Mechanik das Produkt aus dieser Masse und der Beschleunigung, welche sie durch die Kraft erhält.

Die Einheit der Kraft ist also diejenige, welche der Einheit der Masse die Beschleunigung 1 erteilt.

Im C.G.S.-System hat daher die Einheit der Kraft eine solche Größe, daß sie der Masse 1 g die Einheit der Beschleunigung (Nr. 4) erteilt. Diese Krafteinheit bezeichnet man mit einem besonderen Namen, nämlich „1 Dyne". Es werden also im C.G.S.-System alle Kräfte nach Dynen gemessen.

Unsere Gewichte sind Kräfte; sie geben uns nämlich die Kraft an, mit welcher die Erdschwere auf die ihnen gleichbenannten Massen wirkt. Das Gewicht, die Kraft eines Kilogramms ist gleich der Masse eines Kilogramms multipliziert mit der Beschleunigung, welche die Erdschwere dieser Masse erteilen würde, wenn sie frei beweglich wäre. Da die Masse eines Kilogramms 1000 g enthält und da die angeführte Beschleunigung 981 Beschleunigungseinheiten im C.G.S.-System hat, so ist die Kraft eines Kilogramms gleich 981 000 ($9{,}81 \cdot 10^5$) Dynen.

6. Arbeit. Wenn ein Körper sich unter der Wirkung einer Kraft bewegt, so leistet die Kraft eine Arbeit, deren Größe gleich ist dem Produkt aus der Kraft und der Wegstrecke, um welche sich der Körper in Richtung der Kraft fortbewegt hat.

Als Einheit der Arbeit nehmen wir also diejenige an, bei welcher die Krafteinheit ihren Angriffspunkt um die Längeneinheit bewegt. Daher ist im C.G.S.-System die Arbeitseinheit diejenige, welche die Kraft 1 Dyne leistet, wenn sie die angegriffene Masse um 1 cm verschiebt. Diese Arbeitseinheit bezeichnet man mit dem besonderen Namen „1 Erg".

Wenn z. B. ein Kilogramm um einen Meter gehoben wird, so ist die dazu nötige Arbeit $= 981\,000 \times 100 = 98\,100\,000$ Erg.

Die Arbeit „1 Kilogrammeter", welche in der Technik gewöhnlich gebraucht wird, enthält also 98 100 000 ($9{,}81 \times 10^7$) Erg.

Die Arbeit ist nur von dem ganzen zurückgelegten Wege abhängig, durchaus nicht von der größeren oder geringeren Zeit, in welcher dieser Weg zurückgelegt wird.

7. Effekt einer Kraft. Wenn eine Kraft eine Arbeit leistet, so nennt man das Verhältnis der geleisteten Arbeit zu der Zeit, in welcher sie geleistet wird, den Effekt der Kraft.

Es ist also die absolute Einheit des Effektes diejenige, bei welcher die Einheit der Arbeit in der Einheit der Zeit geleistet wird.

Im C.G.S.-System ist also die Einheit des Effektes diejenige, bei welcher 1 Erg in 1 Sekunde geleistet wird. Diese Einheit ist für die gewöhnlich vorkommenden Effekte zu klein und man ist daher übereingekommen, das Zehnmillionenfache (10^7fache) dieser Einheit mit einem besonderen Namen zu bezeichnen, nämlich 1 Watt.

Ein Watt ist also derjenige Effekt, bei welchem in 1 Sekunde 10 Millionen Erg geleistet werden.

In der Technik ist auch das Watt eine zu kleine Einheit, und die Techniker nehmen daher als Maßeinheit des Effektes das Tausendfache eines Watt unter der Bezeichnung 1 Kilowatt. Eine Maschine hat also einen Effekt von 1 Kilowatt, wenn sie in jeder Sekunde 1000 $\times$ 10 Millionen (10^{10}) Erg leistet. Bisher mißt man in der Technik den Effekt von Maschinen gewöhnlich noch nach Pferdekräften, und dieser Gebrauch kommt erst allmählich ganz ab. Unter einer Pferdekraft versteht man denjenigen Effekt, bei welchem in je 1 Sekunde eine Arbeit von 75 Kilogramm-

metern geleistet wird. Da 1 Kilogrammeter nach Nr. 6 gleich $9{,}81 \cdot 10^7$ Erg ist, so ist also eine Pferdekraft in Watt ausgedrückt $= 9{,}81 \times 75$. Das abkürzende Zeichen für die Pferdekraft ist PS, so daß wir haben

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt} = 0{,}736 \text{ Kilowatt}.$$

Da der Effekt einer Kraft die in jeder Sekunde von der Kraft geleistete Arbeit darstellt, so gibt das Produkt aus diesem Effekt und der ganzen Zeit in Sekunden, in welcher die Kraft wirkt, die ganze Arbeit, welche diese Kraft während dieser Zeit geleistet hat. Man multipliziert nun auch häufig, um diese Arbeit darzustellen, die Benennungen des Effektes und der Zeit und spricht also von Wattstunden, Kilowattstunden, Pferdekraftstunden u. dergl. Es ist also z. B. 1 Kilowattstunde gleich der Arbeit von

$$60 \times 60 \times 10^{10} \text{ Erg} = 36 \times 10^{12} \text{ Erg}$$

$$= \frac{36 \cdot 10^{12}}{9{,}81 \cdot 10^7} \text{ Kilogrammeter} = 3{,}67 \cdot 10^5 \text{ Kilogrammeter}.$$

In dieser Weise haben wir für einige der wichtigsten mechanischen Größen aus ihrer bloßen Definition absolute Einheiten entwickelt und wir können nun dazu übergehen, dasselbe für die elektrischen und magnetischen Größen zu tun.

Wir beginnen mit der Einheit des

8. Magnetismus. Einem magnetischen Pol schreiben wir eine gewisse Menge Magnetismus zu. Zwei magnetische Pole ziehen sich dann mit einer Kraft an, die gleich ist dem Produkt ihrer Magnetismusmengen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung.

Da wir die Einheit der Kraft bereits festgestellt haben, nämlich 1 Dyne, und die der Entfernung auch (1 cm), so können wir daraus die Einheit der Magnetismusmenge bestimmen.

Unter der Einheit des Magnetismus verstehen wir diejenige Menge Magnetismus, welche auf eine gleiche, in der Entfernung 1 cm befindliche die Kraft 1 Dyne ausübt.

Ein wirklicher Magnet hat immer zwei Pole, einen nordmagnetischen und einen südmagnetischen. Man bezeichnet als das magnetische Moment eines Magneten das Produkt aus seiner nordmagnetischen Magnetismusmenge und dem Abstand seiner Pole.

Es wird also die Einheit des magnetischen Moments diejenige sein, welche ein Magnet hat, dessen Pole um 1 cm voneinander abstehen und dessen Magnetismusmenge in jedem Pol die Einheit ist.

9. Magnetische Feldstärke. Ein drehbarer Magnetstab erfährt in einem magnetischen Feld eine Drehung, es wird ein Drehungsmoment auf ihn ausgeübt, welches gleich dem Produkt aus der Feldstärke und dem Moment des Stabes ist. Da ein Drehungsmoment gleich einer Kraft mal dem Hebelarm ist, an dem sie wirkt, so ist die Einheit des Drehungsmomentes das Produkt aus 1 Dyne mal 1 cm. Daraus folgt, daß die Einheit der Feldstärke diejenige ist, welche auf einen Magnetstab vom Moment 1 (Nr. 8) die Einheit des Drehungsmomentes ausübt.

Statt des Wortes Feldstärke braucht man auch das Wort „Kraft-

linienzahl pro Quadratzentimeter", indem man sich durch jeden Quadratzentimeter des Feldes gerade so viel Kraftlinien gelegt denkt, als die Feldstärke an dieser Stelle beträgt.

So wie wir hier von einem durch die Erfahrung bewiesenen Anziehungsgesetz ausgegangen sind, um daraus eine Definition und Einheit der Magnetismusmenge abzuleiten, so können und müssen wir auch bei den elektrischen Größen von bestimmten Gesetzen ausgehen, um aus diesen Definitionen und Einheiten für sie zu finden. Dabei hat es sich infolge der vielen Wechselbeziehungen zwischen galvanischen Strömen und Magneten als vorteilhaft erwiesen, dasjenige Gesetz zu Grunde zu legen, welchem diese Wechselbeziehungen unterworfen sind, nämlich das Biot-Savartsche Gesetz. Man nennt das System von elektrischen Einheiten, welches auf diesem Gesetz basiert, deshalb auch das elektromagnetische Maßsystem. Dieses soll hier entwickelt werden.

10. Stromstärke. Wir gehen aus von der Kraft, welche ein Strom auf einen Magneten ausübt. Wir haben das Gesetz derselben auf S. 176 angeführt. Danach verhält sich ein Stromkreis genau wie ein Magnet, dessen magnetisches Moment gleich der Stromstärke multipliziert mit der vom Strom umflossenen Fläche ist.

Da wir die Einheit für das magnetische Moment schon haben (Nr. 8), so entnehmen wir hieraus die Definition für die Einheit der Stromstärke.

Die Einheit der Stärke hat also derjenige Strom, welcher, wenn er ein Quadratzentimeter umfließt, magnetisch so wirkt wie ein Magnet, dessen magnetisches Moment gleich der Einheit ist.

Diese absolute Einheit hat keinen besonderen Namen. Man nimmt vielmehr praktisch eine Einheit an, welche gleich dem 10. Teil dieser so definierten Einheit der Stromstärke ist, und nennt diese Einheit 1 Ampere. 1 Ampere ist also $= \frac{1}{10}$ Einheit der Stromstärke im C.G.S.-System.

11. Elektrizitätsmenge. Unter der Stromstärke verstanden wir immer diejenige Menge Elektrizität, welche in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt eines Leiters fließt.

Danach werden wir diejenige Elektrizitätsmenge die Einheit nennen, welche, wenn sie in einer Sekunde durch einen Querschnitt fließt, die Intensitätseinheit, 1 Ampere, erzeugt.

Man nennt diese Einheit der Elektrizitätsmenge 1 Coulomb.

Es ist also 1 Coulomb = 1 Ampere $\times$ 1 Sekunde.

Eine Amperestunde ist daher gleich $60 \times 60 = 3600$ Coulomb.

12. Elektromotorische Kraft. Ein jeder Strom besitzt einen gewissen Effekt, da er in jeder Sekunde eine gewisse Arbeit leisten kann. Wir wissen, daß dieser Effekt gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke ist.

Daraus entnehmen wir eine Definition und eine Einheit für die elektromotorische Kraft.

Unter der Einheit der elektromotorischen Kraft verstehen wir diejenige, welche, wenn sie einen Strom von der Einheit der Stärke durch den Stromkreis treibt, die Einheit des Effektes erzeugt.

Für praktische Zwecke geht man dabei auch auf die praktische

Effektseinheit, nämlich 1 Watt, zurück und nimmt daher als Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige an, welche, wenn sie den Strom 1 Ampere durch den Stromkreis treibt, einen Effekt von 1 Watt erzeugt. Diese Einheit der elektromotorischen Kraft nennt man 1 Volt. Es ist daher 1 Volt $\times$ 1 Ampere = 1 Watt. In elektrischen Berechnungen ersetzt man deshalb auch zuweilen das Wort Watt durch Volt-Ampere, welche beiden genau denselben Effekt bezeichnen. Da nun, wie wir oben (Nr. 7) gesehen, 1 PS = 736 Watt ist, so ist

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampere} = \frac{1}{736} \text{ PS}.$$

13. Spannung. Da die elektromotorische Kraft nichts weiter ist als die Differenz zweier Spannungen, so ist von vornherein klar, daß die Einheit der Spannung dieselbe ist wie die Einheit der elektromotorischen Kraft, also für praktische Zwecke 1 Volt.

14. Widerstand. Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Widerstand eines Stromkreises gleich dem Verhältnis seiner elektromotorischen Kraft zu seiner Stromstärke.

Die praktische Einheit des Widerstandes ist also derjenige Widerstand, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft, 1 Volt, die Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, erzeugt.

Man nennt diese Widerstandseinheit 1 Ohm. Es gilt daher auch das Ohmsche Gesetz für die Einheiten

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}, \text{ also auch: } 1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm}.$$

15. Kapazität. Unter der Kapazität eines Kondensators verstanden wir das Verhältnis der Elektrizitätsmenge auf seiner Kollektorplatte zu ihrer Spannung, vorausgesetzt daß die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ist.

Die Einheit der Kapazität hat also derjenige Kondensator, welcher, wenn er mit der Einheit der Elektrizitätsmenge, 1 Coulomb, geladen ist, gerade die Spannung 1 Volt besitzt.

Man nennt diese Einheit der Kapazität 1 Farad. Es ist also

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}.$$

Den millionsten Teil dieser Kapazität nennt man 1 Mikrofarad.

16. Selbstpotential. Unter dem Selbstpotential eines Stromkreises verstanden wir (S. 224) diejenige von der Form des Stromkreises herrührende Größe, welche, wenn man sie mit der Änderung der Stromstärke pro Zeiteinheit in diesem Kreis multipliziert, die elektromotorische Kraft des entstehenden Extrastromes angibt.

Wir werden also als Einheit des Selbstpotentials dasjenige nehmen, welches ein Stromkreis besitzt, in welchem gerade die elektromotorische Kraft 1 Volt erzeugt wird, wenn sich in ihm die Stromstärke in 1 Sekunde um 1 Ampere ändert. Diese Einheit nennt man 1 Henry.

Es ist also

$$1 \text{ Henry} = \frac{1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Sekunde}}{1 \text{ Ampere}}.$$

Da $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampere}} = 1$ Ohm ist, so ist auch

$$1 \text{ Henry} = 1 \text{ Ohm} \times 1 \text{ Sekunde}.$$

Deswegen benutzten die Engländer häufig statt des Wortes Henry das geschmacklos gebildete Wort S e c o h m.

Den tausendsten Teil von 1 Henry nennt man ein M i l l i h e n r y.

Damit sind die wesentlichsten elektrischen Größen auf bestimmte Einheiten zurückgeführt, die auch mit den mechanischen Einheiten der Länge, Masse, Zeit, Kraft, Arbeit, Effekt in einfachem Zusammenhang stehen.

Die größeren und kleineren Vielfachen der praktischen Einheiten werden häufig, wie es schon in einigen Fällen angegeben wurde, durch Vorsetzen gewisser Silben bezeichnet. Die Vorsilbe M e g bezeichnet nämlich das Millionenfache der Einheit. Es ist also

1 Megohm = 1 Million Ohm.

Die Vorsilbe M i k r o bedeutet den millionsten Teil der Einheit. Es ist also

1 Mikroampere = 1 Millionstel Ampere,
1 Mikrocoulomb = 1 Millionstel Coulomb,
1 Mikrovolt = 1 Millionstel Volt.

Das Mikrofarad ist schon oben angegeben.

Endlich bedeutet M i l l i den tausendsten Teil der Einheit. Also ist

1 Millivolt = 1 Tausendstel Volt,
1 Milliampere = 1 Tausendstel Ampere.

Ebenso spricht man von Millihenry.

Es genügt natürlich für praktische Zwecke nicht, bestimmte Einheiten für die einzelnen Größen wissenschaftlich definiert zu haben, es müssen auch zum Gebrauch bestimmte Normaleinheiten vorhanden sein, die stets leicht reproduzierbar sind und deren Verhältnis zu den absoluten Einheiten ein für allemal genau bestimmt ist.

Da die drei Größen Stromstärke, Widerstand und elektromotorische Kraft nach dem Ohmschen Gesetz miteinander verbunden sind, so genügt es, für zwei von ihnen die Einheit festgestellt zu haben. Dies ist nun geschehen für die Stromstärke und den Widerstand. Es kam also darauf an, die Stromstärke 1 Ampere so zu bestimmen, daß sie immer reproduzierbar ist, und ebenso den Widerstand 1 Ohm.

Für die S t r o m s t ä r k e geschieht das dadurch, daß man ein für allemal untersucht, wieviel Knallgas oder Kupfer oder Silber der Strom 1 Ampere (der in Nr. 10 definiert wurde) in der Sekunde aus einem Voltameter abscheidet. Diese Bestimmung ist von F. und W. Kohlrausch exakt durchgeführt worden und lieferte das Resultat, daß 1 Ampere in 1 Sekunde 0,1740 ccm Knallgas von normalem Druck und normaler Temperatur entwickelt, oder 0,3284 mg Kupfer oder 1,118 mg Silber abscheidet.

Aus diesen Messungen ergibt sich folgende wichtige Tabelle:

	Der Strom 1 Ampere zersetzt oder scheidet aus				
	mg Silber	mg Kupfer	mg Wasserstoff	mg Wasser	ccm Knallgas von 0° und 760 mm Druck
in 1 Sekunde	1,1181	0,3284	0,01039	0,0933	0,1740
in 1 Minute	67,09	19,70	0,623	5,60	10,44
in 1 Stunde	4025	1182	37,41	336	626

Damit kann man nun durch Messung mit einem Voltameter jede Stromstärke in Ampere ausdrücken.

Ebenso kam es darauf an, den Widerstand 1 Ohm ein für allemal zu fixieren, also etwa die Länge einer Quecksilbersäule von 0° zu bestimmen, welche bei 1 qmm Querschnitt gerade den Widerstand 1 Ohm hat. Die genauesten Messungen liefern nun dafür das Resultat, daß diese Quecksilbersäule 106,3 cm Länge haben muß. Praktisch wird daher 1 Ohm definiert als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt.

Die elektromotorische Kraft eines Stromerzeugers (galvanisches Element, Thermoelement, Induktionsapparat u. dergl.) kann man nun immer in Volt ausdrücken, wenn man sie in einem Stromkreis einen Strom erzeugen läßt. Mißt man den genannten Widerstand des Stromkreises in Ohm und mißt man die Stromstärke in Ampere, so gibt ihr Produkt direkt die gesuchte elektromotorische Kraft in Volt, da

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm}$$

ist. Praktisch benutzt man jedoch häufig die Kadmiumelemente (S. 98) als Vergleichselemente, da deren elektromotorische Kraft unveränderlich gleich 1,019 Volt (zwischen 10 u. 20°) gefunden wurde, oder auch die Clarkelemente, deren elektromotorische Kraft gleich 1,438 Volt (bei 15°) ist.

Auch für Kapazitäten hat man genaue Normalen konstruiert, nämlich die Mikrofarad, von denen S. 19 eine Abbildung gegeben ist. Dieselben bestehen aus Kondensatoren, deren Zwischenschicht gewöhnlich Glimmer ist und deren Größe und Plattenabstand so abgemessen sind, daß sie gerade 1 Mikrofarad Kapazität besitzen. Häufig sind diese noch, wie die Gewichtssätze, in Unterabteilungen geteilt, so daß sie Kapazitäten von 0,1, 0,2, 0,2, 0,5 Mikrofarad enthalten, deren Summe dann gleich 1 Mikrofarad ist.

In neuerer Zeit werden auch für das Selbstpotential Normale angefertigt, 1 Henry oder größere oder kleinere Unterabteilungen desselben darstellend, von denen auf S. 225 eine Abbildung gegeben war.

In dieser Weise sind also die Maßeinheiten in der Elektrizität alle bestimmt und auf sichere Erfahrungen und Grundsätze zurückgeführt.

II. Teil.

Die Anwendungen der Elektrizität.

II. Teil.

Die Anwendungen der Elektrizität.

1. Kapitel.

Die Dynamomaschinen für Gleichstrom.

Die große Leichtigkeit, mit der sich die elektrische Energie in fast alle anderen Formen der Naturerscheinungen umwandeln läßt, in Licht, in Wärme, in Magnetismus, in chemische Energie, in mechanische Bewegung, diese Leichtigkeit macht die Elektrizität ganz außerordentlich zur praktischen Verwendung geeignet. Ein Lichtstrahl bleibt stets ein Lichtstrahl, er leuchtet und erwärmt, aber seine Energie läßt sich nicht (oder nur unvollkommen und schwierig) in andere Formen der Energie umwandeln. Ein elektrischer Strom dagegen braucht nur durch getrennte Kohlenspitzen gesendet zu werden, um Licht zu erzeugen; er braucht nur durch Drähte gesendet zu werden, um Wärme und Licht hervorzubringen; um einen Eisenkern spiralförmig herumgeführt, erzeugt er Magnetismus, in die Nähe eines anderen Stromes oder eines Magneten gebracht, bringt er diesen in Bewegung oder kommt selbst in Bewegung; durch eine zusammengesetzte Flüssigkeit gesendet, erzeugt er chemische Zerlegungen und Verbindungen. Diese leichte Umwandelungsfähigkeit der elektrischen Energie ist eines der Hauptmomente, durch welches die Elektrizität sich einen immer weiteren Raum in der Technik erobert.

Elektrische Ströme zu erzeugen, ist auf verschiedene Weise möglich. Zwei Metalle in eine Flüssigkeit gebracht und zu einem geschlossenen Kreis verbunden, geben einen elektrischen Strom. Es wird der elektrische Strom in solchen Elementen durch Umwandelung von chemischer Energie erzeugt. Zwei verschiedene Metalle, in Berührung miteinander gebracht, erzeugen einen elektrischen Strom, wenn man die eine Berührungsstelle erwärmt oder abkühlt. Es wird der elektrische Strom hierbei, der Thermostrom, durch die Energie der Wärme erzeugt. In einem geschlossenen Drahtkreis, der in der Nähe eines Magneten oder eines elektrischen Stromes in beliebiger Weise bewegt wird, werden elektrische Ströme erzeugt. Es werden diese Ströme, die Induktionsströme, durch Bewegung, also durch Aufwand von Bewegungsenergie, durch Aufwand von mechanischer Arbeit hervorgebracht. Von diesen verschiedenen Erzeugungsweisen elektrischer Ströme ist die letztere für technische Zwecke, bei denen es sich um billige und einfache Erzeugung von Strömen von großer Intensität und oft hoher elektromotorischer Kraft handelt, die einzig zweckmäßige.

Die Anwendung von galvanischen Elementen ist zur Erzeugung von großen Mengen elektrischer Energie eine sehr prekäre. Man kann wohl durch galvanische Elemente Ströme von jeder beliebigen Intensität und elektromotorischen Kraft erhalten, indem man nur die Zahl der benutzten Elemente vermehrt. Aber eben diese Vermehrung der Zahl der Elemente ist für praktische Zwecke ziemlich unmöglich.

Ein jedes Element erfordert eine sorgfältige Behandlung, öfteren Wechsel der Flüssigkeiten und Metalle. Eine große Anzahl von Elementen nimmt einen großen Raum ein. Außerdem entwickeln die galvanischen Elemente zum Teil, und gerade die stärkeren, schädliche und unangenehme Dämpfe. Und endlich ist die Anwendung der Elemente eine sehr teure. In fast allen Elementen wird durch chemische Prozesse Zink in Säuren aufgelöst, der elektrische Strom wird also nur erhalten durch Oxydation (Verbrennung) von Zink, einem sehr teuren Brennmaterial. Aus allen diesen Gründen scheiterten alle Versuche, die mit solchen Batterieen für technische Zwecke angestellt wurden.

Die prinzipiell vorteilhafteste Methode, um elektrische Ströme zu erzeugen, wäre die, direkt die Wärme in Elektrizität umzuwandeln. Aber leider ist eine auch tatsächlich vorteilhafte Methode dafür bisher nicht gefunden worden. Die Thermoelektrizität, die bisher allein in dieser Beziehung in Frage kommt, liefert, selbst bei den vorteilhaftesten Konstruktionen, nur eine sehr geringe Ausnutzung der Wärme, so daß die größeren Thermosäulen zwar für geringe Bedürfnisse nach Elektrizität zweckmäßig sind, wo es mehr auf Bequemlichkeit der Anwendung als auf vorteilhafte Erzeugung ankommt, für große technische Betriebe aber nicht in Frage kommen.

Das wirksamste Mittel dagegen zur einfachen Erzeugung von elektrischen Strömen hoher Energie bietet die Induktion, und insbesondere die Induktion durch Magnete, die sogenannte Magnetoinduktion.

Von einem Magneten gehen nach allen Richtungen Kräfte aus, welche gewisse Wirkungen ausüben. Wir können uns diese Kräfte bildlich versinnlichen, indem wir sie durch Kraftlinien darstellen, die von dem Nordpol ausgehen, durch die Luft oder andere Körper zum Südpol sich hinbiegen und dann gedrängt durch das Eisen des Magnets vom Südpol zum Nordpol verlaufen. Diese Kraftlinien machen weiches, unmagnetisches Eisen, in welches sie eintreten, selbst magnetisch, sie induzieren, wie man es nennt, Magnetismus in dem Eisen. Die Kraftlinien verschiedener, einander nahe gebrachter Magnete stauen sich, wenn sie sich entgegen laufen, und verschmelzen, wenn sie nach derselben Richtung gehen, und erzeugen dadurch Bewegung der Magnete selbst.

Aber diese Kraftlinien, die von einem Magneten ausgehen, wirken nicht bloß auf Eisen magnetisierend und bewegend. Sie erzeugen auch in gewissen Fällen elektrische Ströme. Sobald man einen geschlossenen Drahtkreis, am besten eine Drahtspule, in der Nähe eines solchen Magneten irgendwie bewegt, so werden, wie im ersten Abschnitt ausführlich beschrieben wurde, in dem Drahtkreis, in der Drahtspule momentane Induktionsströme erregt. Die Zahl der Kraftlinien, die in einer Sekunde von der bewegten Spule senkrecht geschnitten werden, entspricht der elektromotorischen Kraft des Induktionsstromes. Vorteilhaft ist es, in

die Spule noch einen Kern von weichem Eisen zu bringen, da dieser in der Nähe des Magneten selbst magnetisch wird, und zwar bei der Bewegung bald stärker und bald schwächer. Diese Veränderung der Stärke des Magnetismus erzeugt aber selbst ebenfalls in der umgebenden Drahtspule Veränderungen der Kraftlinienzahl und daher kräftige Induktionsströme.

Welche Form man den beweglichen Drahtspulen mit ihren Eisenkernen gibt, ist zunächst gleichgültig. Man kann flache Kerne mit Draht umwickeln, man kann lange Eisenzylinder entweder der Quere nach oder der Länge nach mit Drahtwindungen umgeben, man kann endlich eiserne Ringe ganz mit Draht umwinden, in jedem Falle werden Induktionsströme entstehen, wenn diese Spulen mit ihren Kernen in der Nähe von Magneten bewegt werden. Nur wird natürlich je nach der Anordnung die Induktion bald stärker, bald schwächer sein. Im allgemeinen wird man selbstverständlich darauf sehen müssen, daß der zu induzierende Draht sich in möglichst starken magnetischen Feldern bewegt.

Sehr bald nach der Entdeckung der Induktionsströme durch Faraday, schon wenige Jahre nachher, konstruierte Pixii bereits die erste Maschine, welche durch Drehung von Drahtspulen mit Eisenkernen vor Magneten fortdauernde Induktionsströme erzeugte. Er ließ dabei, aus Konstruktionsgründen, nicht die Spulen mit ihrem Eisenkern rotieren und den Magneten feststehen, sondern er stellte im Gegenteil den Eisenkern mit den Spulen fest und brachte einen Hufeisenmagneten um seine Achse in Rotation. Der Effekt auf die Spulen war natürlich derselbe.

Solche Maschinen, die durch Bewegung von Drahtspulen gegen Magnete (oder umgekehrt) Ströme erzeugen, nennt man magnetelektrische Maschinen. Man nennt bei ihnen den Magneten, welcher die Ströme induziert, den induzierenden Magnet oder auch den Feldmagnet, die Drahtspulen mit ihrem Eisenkern bezeichnet man als Induktor oder Anker oder Armatur.

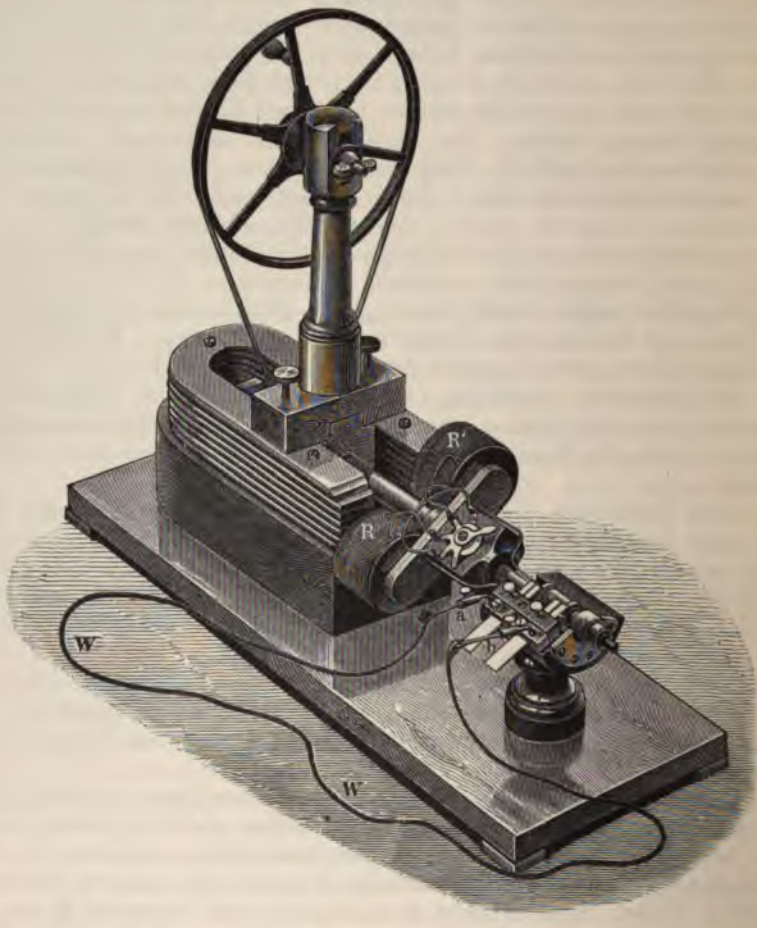
Pixii ließ also den Anker feststehen und den Feldmagneten rotieren aus dem Grunde, weil es dadurch ohne Schwierigkeit möglich war, die Ströme aus den Ankerspulen, die ja dabei fest blieben, mit einem äußeren Stromkreis zu verbinden.

Will man umgekehrt den Magneten feststehen lassen und die Spulen bewegen, so muß man eine Einrichtung treffen, daß der äußere Stromkreis, in welchen man die erzeugten Induktionsströme schicken will, ohne sich mitzubewegen doch in beständigem Kontakt mit dem sich drehenden Induktor bleibt. Dies erreicht man dadurch, daß man die Enden der Spule des Induktors an die Drehungsachse führt und dort jedes Ende an je einen Metallring befestigt, die voneinander und von der Achse isoliert sind. Diese beiden Ringe bilden also die beiden Enden der Spule und an sie wird durch schleifende Kontakte der äußere Schließungskreis angelegt. Man läßt nämlich Bürsten aus Kupferdraht oder auch aus Kohle auf diesen Ringen schleifen und durch diese den Strom von der Maschine in den äußeren Schließungskreis führen.

Ein einfaches Beispiel einer solchen Maschine, wie sie zuerst gebaut wurde (von Stöhrer), zeigt Fig. 326. Wir haben die Wirkungsweise

dieser Maschine schon auf S. 218 f. erörtert. Man sieht in ihr einen hufeisenförmigen Feldmagneten, vor dessen Polen die Rollen R′ R mit ihrem Eisenkern durch Drehung der Achse mittels des Rades rotieren. Die Enden des Drahtes, der auf die Rollen R und R′ aufgewickelt ist, gehen in zwei Schleifringe auf der Achse, auf denen die in der Figur sichtbaren Bürsten schleifen. Bei a und b sind an diese Bürsten die Drähte

Fig. 326.



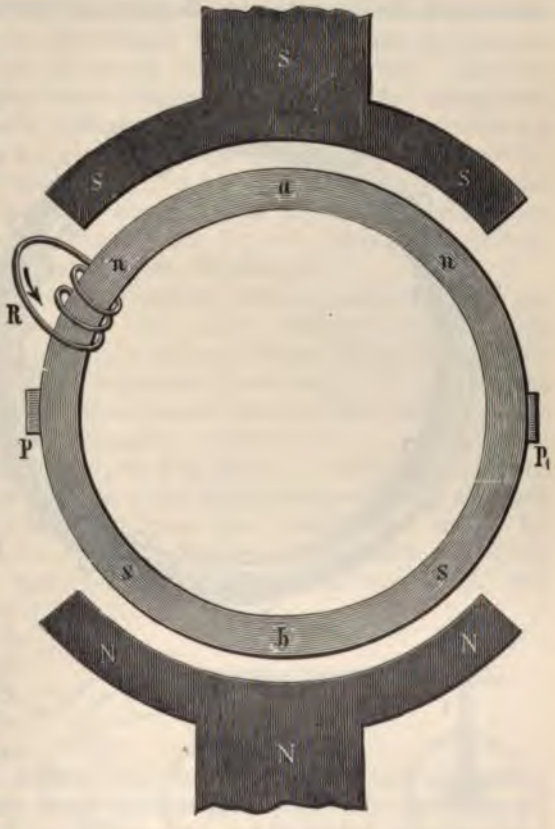
des äußeren Stromkreises W W befestigt. Zunächst geben diese Maschinen, wie wir früher gesehen haben, Wechselströme. Man kann aber durch einen passend eingerichteten Kommutator mit Leichtigkeit die einzelnen Induktionsströme für den äußeren Stromkreis alle gleich richten, so daß man in diesem fortwährend Ströme von derselben Richtung erhält.

Bei dieser Maschine und bei allen ähnlichen zuerst konstruierten Maschinen besteht der Induktor aus Drahtspulen, deren Enden frei sind

und durch den äußeren Schließungskreis verbunden werden. Die beiden Schleifringe bilden immer die freien Enden des Drahtes. Es ist immer ein offener Draht, der den Eisenkern umgibt, ein Draht mit freien Enden, von denen jedes bei der Drehung abwechselnd positiv und negativ elektrisch wird. Zur Erzeugung von Gleichströmen verbindet ein Kommutator die Enden des äußeren Stromkreises mit diesen freien Enden des Induktordrahtes bald direkt, bald übers Kreuz.

Es war nun zuerst ein Italiener, Pacinotti, der die Induktionsströme in einem ganz anderen Induktor erzeugte und untersuchte. Pacinotti nahm nämlich als Eisenkern einen geschlossenen eisernen Ring und umwickelte diesen vollständig mit Draht. Die Enden dieses Drahtes lötete er aneinander, so daß der Draht vollkommen geschlossen war und keine freien Enden mehr hatte. Ein solcher Induktor, den man oft den Pacinottischen Ring, gewöhnlich aber den Grammeschen Ring nennt, weil er durch Gramme erst allgemein bekannt wurde, ein solcher Induktor zeigt nun merkwürdige, aber leicht zu übersehende Erscheinungen, wenn man ihn vor den Polen eines Magneten rotieren läßt, Eigenschaften, die wir aus einer Betrachtung der Fig. 327 leicht erkennen können.

Fig. 327.

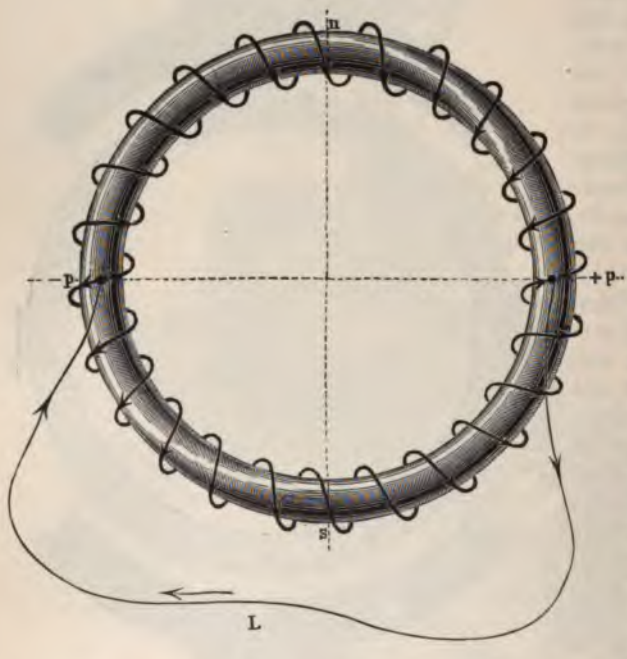


Der Ring ist fortlaufend mit Draht umwickelt, wie es die drei gezeichneten Drahtwindungen R andeuten, und befindet sich zwischen den Polen S und N eines kräftigen Hufeisenmagneten, der mit Polschuhen versehen ist, welche den Ring zum Teil umfassen. In dem Ring von weichem Eisen wird nun durch den südmagnetischen Polschuh S S an den ihm gegenüberliegenden Stellen Nordmagnetismus n n induziert, und durch den nordmagnetischen Polschuh N N entsprechend Südmagnetismus s s. Wenn der Ring rotiert, so kommen stets neue und neue Eisenteilchen gegenüber von N N und S S und stets werden an diesen Stellen die Pole s und n erzeugt. Ist der Ring von ganz weichem Eisen,

so verliert jedes Teilchen seinen Magnetismus bald, sowie es aus der Nähe des induzierenden Polschuhes sich entfernt hat. Es ist also stets dem Polschuh N N gegenüber der Ring südmagnetisch, dem Polschuh S S gegenüber nordmagnetisch. Dadurch, daß der Eisenring rotiert, wird daran nichts geändert. Der Ring ist nun mit Draht fest umwickelt. Wir können daher die Erscheinungen auch vollkommen untersuchen, wenn wir annehmen, daß der eiserne Kern nicht rotiert, sondern ganz fest bleibt, und daß nur die Drahtwindungen um den Eisenkern herumlaufen.

In der beweglichen Rolle R entstehen nun Induktionsströme und zwar durch die einwirkenden Magnete in Verbindung mit dem magnetisch gewordenen Eisenkern.

Fig. 328.



In der oberen Hälfte der Figur von p bis p_1 ist ein magnetisches Feld vorhanden, das gebildet wird von dem südmagnetischen Polschuhe und dem nordmagnetisch gewordenen Eisenkern. Die Kraftlinien haben also in der oberen Hälfte der Figur die Richtung von dem Ringe zum Polschuh. In diesem Felde bewegt sich nun die Spule, indem sie bei der Bewegung ihre Fläche dreht von der horizontalen Lage in p bis zur vertikalen Lage in a und in demselben Sinne weiter bis zur horizontalen Lage in p_1. Auf diesem ganzen Wege, der immer in demselben Sinne durch ein und dasselbe Feld hindurchgeht, behält daher der entstehende Induktionsstrom immer dieselbe Richtung in der Spule, wobei er an Stärke von p bis a zunimmt und dann wieder abnimmt. Bei der weiteren Bewegung von p_1 nach unten kommt die Spule in ein magnetisches Feld von entgegengesetzter Richtung, in welchem der Nordpol außerhalb der Spule, der Südpol innerhalb derselben ist. Die Richtung des Stromes ist daher auf dieser Hälfte die entgegengesetzte und bleibt so von p_1 über b bis p, wobei die Stärke des Stromes zunimmt von p_1 bis b und dann abnimmt von b bis p. In der Mitte zwischen den beiden Ringhälften, an den Stellen p und p_1, muß also der Strom in der Spule seine Richtung ändern, also

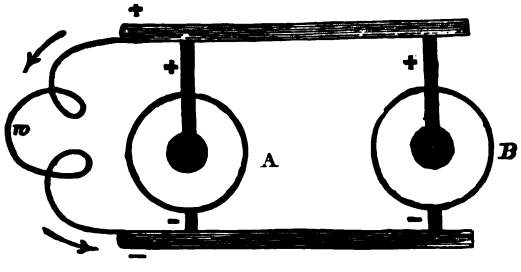
durch die Stromstärke Null hindurchgehen, d. h. wenn die Spule an den Punkt p oder p_1 gekommen ist, so fließt kein Strom in ihr.

So wird also eine Rolle R bei ihrem Umlauf um den eisernen Ring der Reihe nach an zwei Punkten p und p_1 stromlos, aber sonst in den beiden Hälften des Ringes stets von Strömen durchflossen sein. Diese Stellen bezeichnet man als Indifferenzstellen oder als neutrale Zone.

Nehmen wir nun an, daß der ganze Ring mit solchen Rollen umgeben ist, wie es in Fig. 328 durch eine Reihe von Drahtwindungen angedeutet ist, welche einen geschlossenen Kreis um den ganzen Ring bilden. Wenn diese ganze Drahtumwickelung um den Eisenring herumläuft, so haben stets die in der oberen Hälfte des Ringes induzierten Ströme die entgegengesetzte Richtung wie in der unteren. An den Stellen + p und — p kommen diese entgegengesetzten Ströme zusammen. Da nun der Draht ein in sich vollkommen geschlossener ist, so müssen sich diese entgegengesetzt gerichteten Ströme in dem Draht vollkommen aufheben, es fließt dann in der Umwickelung des Ringes gar kein Strom. Von allen oben befindlichen Windungen fließt der positive Strom nach + p hin (also von — p weg) und ebenso von allen unten befindlichen Windungen.

Man kann aber diese Stromkombination noch in anderer Weise ansehen. Man kann die Stellen + p und — p so auffassen, wie aus den Pfeilen in der Figur deutlich wird, als ob von beiden Hälften des Ringes nach + p fortwährend positive Elektrizität hinströmt, von — p dagegen fortwährend positive wegströmt. Dann lassen sich die beiden Drahthälften auffassen als zwei galvanische Elemente, welche je an — p ihren negativen Pol und an + p ihren positiven Pol haben. Verbindet man zwei gleiche galvanische Elemente so mit ihren gleichnamigen Polen, so heben sich die Ströme in ihnen auf. Man kann aber andererseits, wie es bei dem Parallelschalten von zwei Elementen geschieht, die beiden miteinander verbundenen positiven Pole und ebenso die beiden miteinander verbundenen negativen Pole zusammen durch einen äußeren Verbindungsdraht schließen. Dann fließt in dem äußeren Draht der Strom von dem einen Polpaar zum anderen.

Fig. 329.



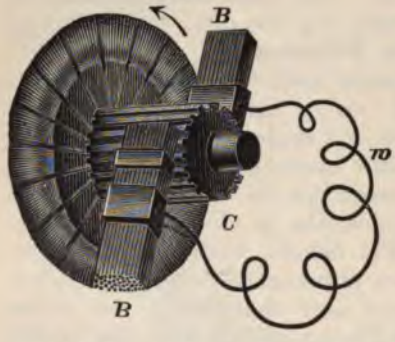
Eine solche Verbindung zeigt Fig. 329. In dieser sind A und B die beiden parallelgeschalteten Elemente und w ist der äußere Schließungskreis, in welchem also die Elektrizität in der Richtung der Pfeile fließt. Ganz dasselbe kann man bei dem Grammeschen Ring machen. Sobald man die Stellen + p und — p durch den äußeren Schließungsdraht L in Fig. 328 verbindet, fließt der positive Strom fortwährend in diesem in der Richtung der Pfeile.

So hat man also ein einfaches Mittel, um in dem äußeren Schlie-

ßungsdraht einen Strom von gleichbleibender Richtung zu erzeugen, einen Strom, der durch kontinuierliche Rotation eines mit Draht umwickelten Eisenringes entsteht.

Bei der wirklichen Ausführung eines solchen Ringes bildete nun Gramme, wie Fig. 330 zeigt, die Umwickelung des Ringes aus einer großen Anzahl von einzelnen Drahtspulen, deren Enden er an die Achse führte und dort in Kupferstreifen ausgehen ließ. Die Kupferstreifen sind dann alle voneinander isoliert und ein jeder bildet die Verbindung zwischen dem Ende der einen und dem Anfang der benachbarten Spule. Es sind also ebensoviele Kupferstreifen vorhanden wie einzelne Spulen und die Spulen sind alle hintereinander verbunden, so daß sie eine vollständig gleichlaufende Umwickelung des Eisenringes bilden. An denjenigen beiden Kupferstreifen, welche den Stellen + p und — p entsprechen, welche also zunächst senkrecht zu der Verbindungslinie der Magnetpole stehen, schleifen Bürsten B B, welche von ihnen den Strom abnehmen und in die äußere Leitung w senden. Den auf der Achse sitzenden Teil C, der aus einer Anzahl Kupferstreifen und dazwischen liegenden isolierenden Glimmerstreifen besteht, nennt man den Kollektor (Stromsammler), auch wohl Kommutator, obwohl er kein eigentlicher Stromwender ist. Daß der Ring aus einer großen Zahl von einzelnen Spulen gebildet wird, die durch die Streifen des Kollektors je miteinander verbunden sind, hat folgenden Zweck. Nehmen wir an, es sei die ganze eine Hälfte des Ringes fortlaufend mit Draht umwickelt und die ganze andere Hälfte auch, und die zwei Enden jeder dieser Bewickelungen würden zu je einem Streifen auf dem Kollektor geführt, so würden die Bürsten auch, sobald die Streifen bei der Drehung bei ihnen vorbeipassieren, den Strom von ihnen abnehmen und in die äußere Leitung führen. Aber man sieht, daß dann eine sehr lange Unterbrechung des Stromes entstehen würde. Nur nach je einer halben Umdrehung des Ringes würde wieder ein Strom in die äußere Leitung geschickt werden. Je mehr Spulen vorhanden sind, je mehr Abteilungen der Kollektor besitzt, desto rascher folgen also die einzelnen gleichgerichteten Ströme in der äußeren Leitung aufeinander, desto mehr wird also der Strom zu einem kontinuierlichen.

Fig. 330.



Wenn aber nun bei der Rotation in den Umwindungen des Ringes und in dem äußeren Stromkreis ein Strom fließt, so tritt dadurch sofort eine Änderung in den eben betrachteten Verhältnissen ein. Die in den Drähten des Ringes, den sogenannten Ankerwindungen, fließenden Ströme üben ja selbst wieder für sich magnetische Kräfte aus und suchen den Eisenring für sich zu magnetisieren. Und zwar erzeugen sie, wie man aus der Ampèreschen Schwimmerregel (S. 160) erkennt, einen Nordpol und einen Südpol an den Stellen p_1 und p der Fig. 327, während der äußere Magnet an den Stellen n und s die Pole erzeugt. Diese beiden

magnetisierenden Kräfte, die senkrecht aufeinander wirken, setzen sich zusammen und bewirken, daß in dem Ring die beiden Pole etwas in der Richtung der Drehung verschoben sind. Daraus folgt, daß unter dem Einfluß dieser magnetischen Wirkungen des Ankerstromes durch die Ankerrückwirkung auch die neutrale Zone nicht mehr genau senkrecht zu den ursprünglichen Kraftlinien liegen bleibt, bei p und p_1, sondern ebenfalls um einen bestimmten Winkel in der Richtung der Bewegung des Ringes gedreht ist. Es verschiebt sich also durch die Ankerrückwirkung die neutrale Zone des Ringes, an der der Strom sich umkehrt, etwas in der Richtung der Bewegung, und man darf deshalb die Drahtbürsten nicht direkt senkrecht zur Verbindungslinie der induzierenden Pole stellen, sondern muß sie etwas in Richtung der Drehung verschieben. Wie weit sie zu verschieben sind, das hängt von dem Verhältnis der Stärke der direkten magnetischen Wirkung der induzierenden Magnete und der Stärke der Ankerrückwirkung ab, ist also bei verschiedenen Stromstärken verschieden.

Durch Anwendung eines solchen Ringes als Induktor ist es also nun möglich, direkt Induktionsströme von konstant bleibender, unveränderlicher Richtung, also Gleichströme, zu erhalten. Man braucht eben nur den Ring drehbar zwischen die Pole eines Hufeisenmagnets zu bringen, um von den Schleifbürsten stets einen Strom von einerlei Richtung abnehmen zu können.

Die Erfindung des Grammeschen Ringes war das eine wesentliche Moment, welches den Aufschwung der Elektrotechnik hervorgerufen hat.

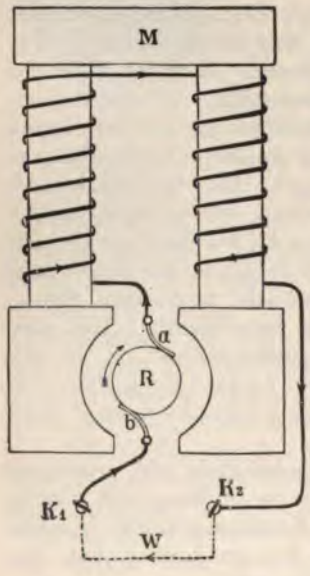
Ein zweites aber, das wesentlichste Moment, bestand in folgendem. Zunächst wurden bei allen magnetelektrischen Maschinen Stahlmagnete angewendet, um die Ströme zu induzieren. Nun ist aber der Magnetismus von Stahlmagneten ein verhältnismäßig unbedeutender. Er ist außerordentlich viel schwächer als der Magnetismus, den man durch elektrische Ströme in gleich großen Stücken von weichem Eisen erzeugen kann. Man konnte daher von vornherein sagen, daß die Induktionsströme einer solchen magnetelektrischen Maschine viel stärker werden müßten, wenn man statt der Stahlmagnete Elektromagnete zur Induktion benutzte. Aber hier trat nun sofort folgende wichtige Frage auf: Um diese Elektromagnete zu erzeugen, braucht man einen Strom, der eben um die Eisenkerne der Feldmagnete herumfließt. Muß man nun diesen Strom aus irgend einer äußeren Quelle nehmen, z. B. aus einer Batterie, oder kann man den Strom, der im Induktor entsteht, selbst zur Magnetisierung der Feldmagnete benutzen?

Schon die Stellung dieser Frage war eine bedeutende und prinzipiell höchst wichtige Tat. Und der Fortschritt, der in der Stellung und Lösung dieser Frage liegt, ist eine der bedeutendsten Errungenschaften, die die Technik dem Genie von Werner Siemens zu danken hat, der im Jahre 1867 diese Frage aufwarf und zugleich löste.

Siemens sagte sich, daß es gewiß nicht nötig sei, die Elektromagnete durch einen fremden Strom, etwa von einer Batterie, erregen zu lassen, sondern daß man diese durch den Strom der eigentlichen Maschine selbst erregen lassen könne. Wenn einmal in einem Induktor ein Gleichstrom

erzeugt sei, so brauche man diesen ja bloß in Spiralwindungen um die Magnete passend herumzuführen, um die Stärke dieser Magnete erheblich zu vergrößern. Oder noch mehr, da jedes Stück Eisen durch den Erdmagnetismus schon ein wenig magnetisch ist, so braucht man als induzierenden Körper nur ein hufeisenartig geformtes Stück weichen Eisens zu nehmen und um dieses den Strom aus dem Induktor herumzuführen, um es zu einem kräftigen Magneten zu machen und dadurch den Strom aus dem Induktor erheblich zu verstärken. Dies ist das berühmte Dynamoprinzip von Siemens und nach diesem Prinzip, entweder in direkter oder in modifizierter Anwendung, werden sämtliche neuen Maschinen gebaut. Es ist also bei diesen Maschinen von vornherein gar kein eigentlicher Magnet vorhanden; der schwache remanente Magnetismus jedes Eisenkerns leitet die Wirkung ein und erst durch den Gang der Maschine werden die Magnete erzeugt und beeinflussen dann in der erheblichsten Weise die Wirksamkeit der Maschine. Aus diesem Grunde, weil der Magnetismus gewissermaßen nur als Zwischenprodukt auftritt, um die Verwandelung der aufgewendeten Arbeit in Elektrizität zu vermitteln, nannte Siemens diese Maschinen Dynamomaschinen von δύναμις, dynamis, Arbeit, oder auch dynamoelektrische Maschinen. Bei einer solchen Maschine wird also zunächst der schwache, remanente Magnetismus, den jedes, auch das weichste Eisen, zurückbehält, benutzt, um bei der Drehung des Ankers zuerst einen schwachen Strom in ihm zu erzeugen. Dieser fließt nun um die Eisenkerne in passender Richtung, macht sie also zu Magneten, wenn auch schwachen, und wird nun dadurch selbst wieder verstärkt. So verstärkt der Strom fortwährend den Magnetismus, der Magnetismus fortwährend den Strom, bis schließlich die Magnete zum Maximum magnetisiert sind und so die höchste Wirksamkeit der Maschine erreicht ist. Technische Konstruktionen sind immer genial und hervorragend leistungsfähig, wenn sie es verstehen, Anordnungen zu treffen, durch welche Ursache und Wirkung sich gegenseitig verstärken. Das ist der Fall bei der Dynamomaschine, das ist auch bei der Influenzmaschine und der Luftverflüssigungsmaschine von Linde der Fall, um nur einige dieser Konstruktionen zu nennen.

Fig. 331.

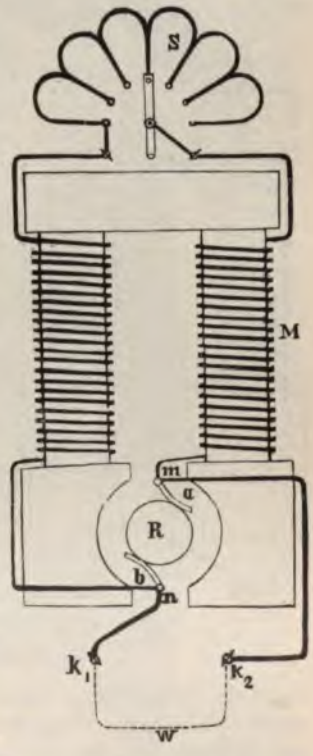


Der erste, der diese beiden wesentlichen Prinzipien, den Grammeschen Ring und das Siemenssche Dynamoprinzip, zur Konstruktion einer Maschine benutzte, war Gramme, und seine Maschinen waren von Anfang an so ausgezeichnet gebaut, daß sie lange Zeit zu den besten und leistungsfähigsten Maschinen gehörten.

Das Schema einer derartigen Dynamomaschine, wie sie von Gramme und anderen gebaut wurde, ist in Fig. 331 gezeichnet. Man

sieht dabei einen Elektromagneten M, der hufeisenförmig gestaltet ist und zwischen seinen Polschuhen den Ring R trägt. Dessen Kommutator ist nicht besonders gezeichnet, sondern die Bürsten a und b schleifen in der Figur direkt auf dem Ring. Der äußere Stromkreis, durch den der bei der Drehung des Ringes erzeugte Strom fließt, ist mit w bezeichnet. Man sieht, daß der Anker der Maschine, die Feldmagnete und der äußere Schließungskreis dabei hintereinander geschaltet sind. Der Strom fließt der Reihe nach von den Drähten des Ankers R durch die Bürste a um die Windungen der beiden Elektromagnetschenkel M herum zur einen Polklemme K_2, von dieser durch den äußeren Schließungskreis w zur anderen Polklemme K_1 und durch die Bürste b in den Anker zurück. Anker, Elektromagnet, äußerer Schließungsdraht bilden also einen einzigen unverzweigten Stromkreis; es kommt bei der Stromstärke ihr Gesamtwiderstand in Betracht. Dabei sind übrigens stets die beiden Hälften der Ankerwindungen einander parallel geschaltet, so daß in jeder Hälfte nur ein Strom von der halben Stärke des äußeren Stromes fließt. Solche Maschinen nennt man Hauptstrommaschinen.

Fig. 332.



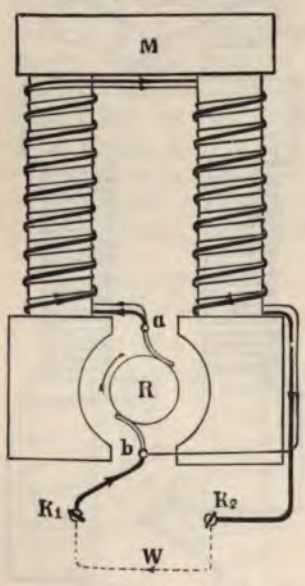
Man kann aber das Dynamoprinzip auch in anderer Weise anwenden. Man kann nämlich den Strom, der von den Ankerdrähten kommt, direkt in die äußere Leitung führen und um die Magnete herum nur einen Zweigstrom senden. Eine solche Anordnung zeigt das Schema in Fig. 332. Hier teilt sich der Strom, der durch die Bürsten a und b aus dem Anker R kommt, bei m und n und geht zum Teil durch den äußeren Schließungskreis w, zum Teil aber in vielen Windungen um die Magnete M. Man bezeichnet Maschinen mit dieser Anordnung als Nebenschlußmaschinen. Die Stromstärken in den beiden Zweigen w und M verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände. In die Magnetbewickelung wird gewöhnlich noch ein variabler Widerstand S (ein Regulierwiderstand) eingeschaltet, um die Stärke des Magnetstromes passend zu verändern. Seine Einrichtung ist aus der Figur selbst klar. Diese Schaltung ist eine sehr vorteilhafte, sie ist namentlich dann von großem Wert, wenn der Widerstand der äußeren Leitung nicht unverändert gehalten wird, sondern wenn er veränderlich gemacht wird, ein Fall, der bei der Benutzung von Dynamomaschinen gewöhnlich vorliegt. Deswegen werden die Dynamomaschinen heute in den meisten Fällen, zu mehr als 90 Proz., als Nebenschlußmaschinen gebaut.

Eine dritte Schaltung, die in manchen Fällen mit Vorteil angewendet wird, ist die sogenannte Compoundschaltung. Diese besteht

darin, daß man die Magnete sowohl durch den Hauptstrom als durch einen Zweigstrom erregen läßt. So gebaute Maschinen nennt man Compoundmaschinen. Ihr Schema ist in Fig. 333 gezeichnet. Von dem Ring R geht durch die Bürsten der Hauptstrom (stark gezeichnet) um die Magnete M und durch den äußeren Widerstand w; außerdem aber zweigt sich bei a und b der schwach gezeichnete Nebenstrom ab und fließt in vielen Windungen allein um die Magnete. Welchen Vorteil diese Schaltung gewährt, wird später klar werden.

Selbstverständlich kann man auch die Magnete einer Dynamomaschine nicht durch ihren eigenen Strom, sondern durch den Strom einer anderen erregen lassen. Man bezeichnet sie dann als Dynamomaschine mit Fremderregung. Im Gegensatz dazu bezeichnet man zuweilen die eigentlichen Dynamomaschinen als Maschinen mit Eigenerregung.

Fig. 333.



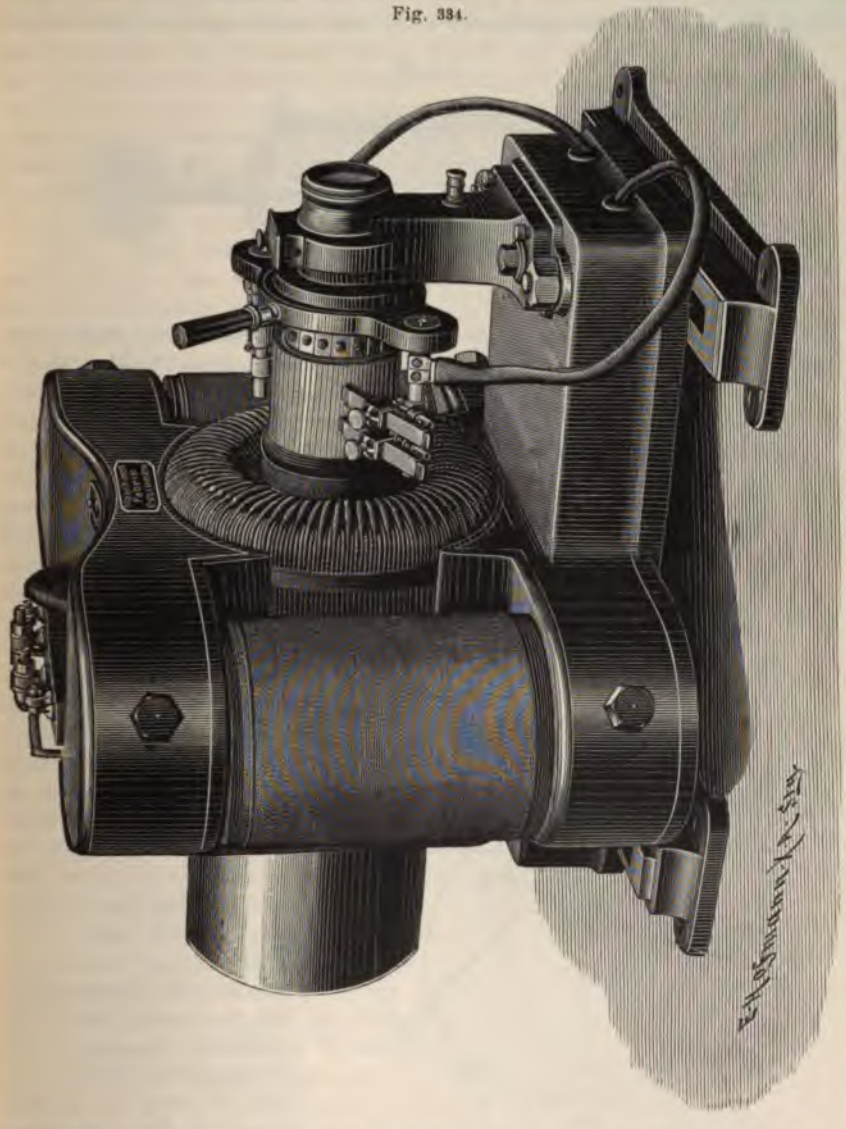
Als ein Beispiel einer solchen Dynamomaschine mit dem Grammeschen Ring möge in Fig. 334 eine ältere, aber übersichtliche Maschine der Maschinenfabrik Eßlingen dienen. Dieselbe ist eine Nebenschlußmaschine. Man sieht in ihr die zwei Magnetschenkel, welche oben und unten durch Eisenmassen verbunden sind und welche so geschaltet sind, daß die obere Eisenmasse etwa nordmagnetisch, die untere südmagnetisch wird. Zwischen diesen Polschuhen befindet sich der Grammesche Ring, der eine breite zylinderartige Form hat. Man sieht an demselben rechts den Kommutator, an dem je zwei Bürsten schleifen.

Der Grammesche Ring gab zum erstenmal eine Form des Ankers, bei welcher man ohne einen eigentlichen Kommutator Gleichströme aus einer magnetelektrischen oder Dynamomaschine entnehmen konnte. Zugleich bietet die Form des Ringes die Möglichkeit, die Drahtwindungen sehr nahe an den Polen der Feldmagnete rotieren zu lassen und dadurch sehr starke Induktionen zu erzielen. Aber die Ringform hat auch einen großen Nachteil. Die Teile der Drähte, welche im Innern des Ringes sich befinden, werden nicht induziert, sie tragen also zur Erzeugung des Stromes nichts bei, sondern bilden nur nutzlosen Widerstand. Deswegen suchte man andere Formen des Ankers zu ersinnen, welche die Vorzüge des Ringes, ohne seine Nachteile, besitzen, welche aber vor allem ebenfalls direkt ohne Kommutator Gleichströme abzunehmen gestatten sollten, und in der Tat fand bald darauf Hefner-Alteneck, daß man die Drähte auch auf einen Zylinder so aufwickeln kann, daß sie sich ebenso in zwei Hälften parallel schalten lassen wie bei dem Ring.

Der Anker, welchen Hefner-Alteneck konstruierte, ist also ein eiserner Zylinder und wird Trommelanker genannt. Er ist der Länge nach mit Draht umwickelt und rotiert dicht zwischen den Pol-

schuhen eines Magneten. In Fig. 335 ist ein solcher Trommelanker gezeichnet. Es ist darin $N N_1$ der nordmagnetische Polschuh des induzierenden Magnets, SS_1 der südmagnetische. Der Eisenzylinder, welcher

Fig. 334.



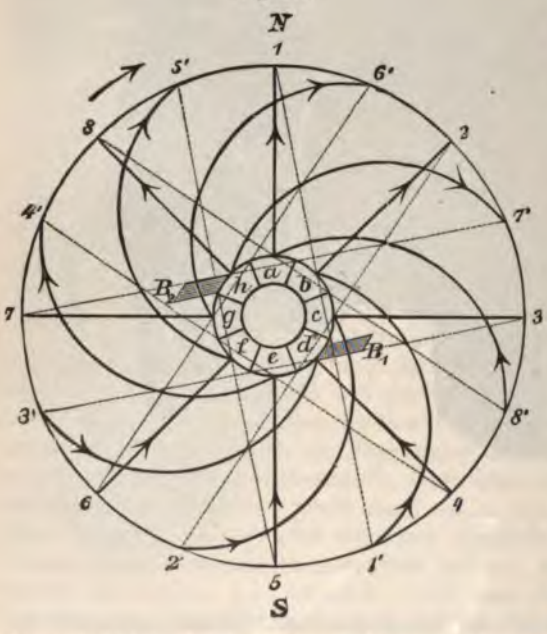
auf der Achse $F_1 F_2$ sitzt und der Länge nach mit Draht umwickelt ist, erhält also dem Nordpol gegenüber Südpole $s s_1$ und dem Südpol gegenüber Nordpole $n n_1$, so daß bei der Drehung die Drähte sich in sehr engen, daher intensiven magnetischen Feldern bewegen. Die Umwickelung des Zylinders besteht nun ebenfalls wie beim Grammeschen Ringe aus einer

Reihe von Drahtspulen, von denen je das eine Ende in ein Kollektorsegment geführt ist und das andere Ende in ein benachbartes Segment. Nehmen wir zunächst einen einzelnen Draht, welcher um den Zylinder herumgelegt ist, etwa den Draht e e der Fig. 335. Bei der Bewegung entsteht in der oberen Hälfte ein Stromimpuls, der z. B. nach rechts geht, in der unteren

Fig. 335.

Hälfte der entgegengesetzte, nach links, und da der Draht zusammenhängend ist, so addieren sich diese Impulse, und in dem Draht, wenn er geschlossen wäre, würde ein Strom von bestimmter Richtung zirkulieren. Es geht also die positive Elektrizität oben von p fort und unten nach p_1 hin. Dasselbe findet nun bei allen Spulen der Umwickelung statt, deren Enden, wie gesagt, jedesmal zu zwei benachbarten Segmenten eines Kollektors geführt sind. Immer findet dann also oben ein Fortströmen der Elektrizität von dem Kollektor statt, unten ein Zuströmen zu ihm.

Fig. 336.



Wenn man nun die Drähte alle in zwei Hälften so zusammenfaßt, daß in der einen Hälfte der Strom zum Kollektor hin-, in der anderen von ihm fortfließt, dann kann man ebenso wie beim Grammeschen Ring an den Indifferenzstellen den Strom aus beiden Hälften nach außen ableiten. Die Drahtverbindungen kann man dabei noch auf verschiedenfache Weise ausführen. Am übersichtlichsten und einfachsten ist die Verbindung, welche durch Fig. 336 dargestellt ist. In dieser betrachten wir die Trommel von vorn, vom Kollektor aus, und nehmen an, daß 8 Drähte auf ihr aufgewickelt sind. Da jeder von den 8 Drähten zweimal der Länge nach auf dem Zylinder liegt, so ist der Zylindermantel von 16 Drähten belegt. Durch die mit

den Zahlen 1, 2 . . . 8, 1′, 2′ . . . 8′ bezeichneten Punkte sind die Stellen angegeben, wo diese 16 Drähte vorn auf der Kollektorseite der Trommel, der Stirnfläche, liegen. Dabei gehören 1 u. 1′ zu einem zusammenhängenden Draht, ebenso 2 u. 2′ u. s. f. Wie die Drähte vorn auf der Stirnfläche laufen, ist dabei durch die ausgezeichneten Linien, wie sie auf der Rückfläche der Trommel laufen, durch punktierte Linien angegeben. Da 8 verschiedene Drähte vorhanden sein sollen, so muß der Kollektor aus 8 Teilen, a, b, c . . . bis h bestehen. Wir nehmen an, daß oberhalb der Trommel ein Nordpol, unterhalb ein Südpol sich befinde, und daß die Trommel sich nach rechts, wie ein Uhrzeiger, dreht. Dann fließen in der oberen Hälfte der Figur auf der Trommel die Ströme von der Stirnfläche zur Rückfläche, unten umgekehrt von der Rückfläche zur Stirnfläche.

Nun teilen wir zuerst den Umfang der Stirnfläche in 8 Teile ein und bezeichnen die entsprechenden Punkte der Figur mit 1, 2 . . . bis 8. Da hier, bei einer geraden Zahl der Drähte, der Punkt 5 dem Punkt 1 gerade gegenüberliegt, so können wir das andere Ende des Drahtes 1, welches mit 1′ bezeichnet ist, nicht nach 5 legen, können also den Draht nicht genau diametral um die Trommel legen, sondern müssen es nach rechts oder links von 5 verlegen. In der Figur ist es nach rechts verlegt an den Punkt 1′. Von dort aus folgen sich dann in den Mitten der vorher bestimmten Abteilungen die Punkte 2′, 3′ . . . bis 8′.

Und nun sieht man, daß die Schaltung eine sehr einfache ist. Vom Kollektorstück a ausgehend, gehen wir auf der Stirnseite bis 1, dann oben auf der Trommel entlang, dann auf der Rückseite der Trommel schief nach unten, so daß wir auf der Unterseite der Trommel nach 1′ kommen. Dieses Ende 1′ muß nun einfach zu dem folgenden Kollektorsegment b führen. Von dort geht dann der zweite Draht 2 aus, der nach 2′ kommt und dann mit c verbunden wird und so fort, bis das letzte Ende 8′ wieder mit a verbunden ist. Verfolgt man mittels der Pfeile die Stromrichtung in den Drähten, so sieht man, daß zum Kollektorstück d zwei Drähte kommen, die beide den Strom zu ihm hinführen, zum Kollektorstück h zwei Drähte, die beide den Strom von ihm fortführen. An diese beiden Stellen müssen also die Bürsten B_1 und B_2 angelegt werden.

Die Hefnersche Trommel hat den Vorzug, daß bei ihr fast der ganze Draht, mit Ausnahme des kleinen Teils auf der Stirnfläche und Rückfläche, wirklich zur Erzeugung des Stromes ausgenutzt wird. Die Wickelung der Drähte auf die Trommel ist zwar schwierig, sie läßt sich aber vorher in Schablonen ausführen, die nachher einfach auf die Trommel geschoben werden. Zugleich wird bei ihr die ganze Eisenmasse der Trommel magnetisch ausgenutzt, so daß die Dynamomaschinen jetzt fast nur noch mit Trommelanker, nicht mit Ringanker ausgeführt werden. Der Grammesche Ring ist bereits fast eine nur historische Konstruktion geworden.

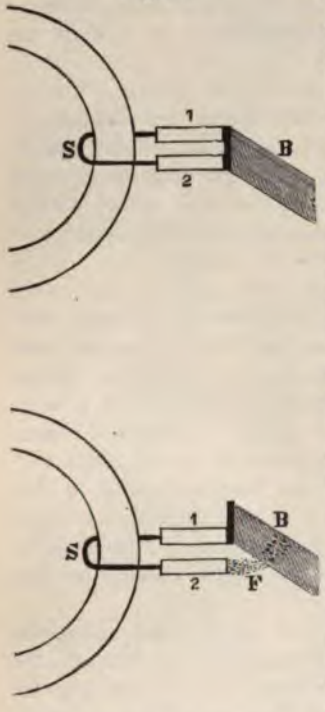
Bevor wir nun näher auf die Konstruktion der einzelnen Maschinen, sei es mit Ringanker oder mit Trommelanker, eingehen, ist es zuerst notwendig, einige allgemeine Verhältnisse der Dynamomaschinen zu erörtern.

Wenn der Anker (Ring oder Trommel) der Dynamomaschine in dem Feld der Magnetschenkel rotiert, so werden nicht bloß in der Drahtumwickelung, sondern auch in dem Eisen des Ankers selbst Induktionsströme, die sogenannten Foucaultschen Ströme oder Wirbel-

ströme (S. 222), erregt. Diese sind nun dem Betrieb der Maschine in jeder Hinsicht schädlich; denn erstens erfordern sie zu ihrer Erzeugung Aufwand von Arbeit und zweitens setzen sie sich, da sie in den metallischen Leitern fließen, in Wärme um und erhitzen daher den Eisenanker sehr beträchtlich. Es ist also Aufgabe der Konstruktion, das Zustandekommen dieser Ströme möglichst zu verhindern.

Diese Induktionsströme fließen nun immer in der Richtung der größten Induktion, und da man natürlich in dieselbe Richtung auch die Drähte legt, die induziert werden sollen, so fließen die Foucaultschen Ströme immer parallel zu den um den Anker gelegten Drähten. Wenn man daher den metallischen Zusammenhang des Eisenankers in der Richtung dieser Foucaultschen Ströme unterbricht, so wird das Zustandekommen derselben gehindert werden. Aus diesem Grunde wird der Eisenkern der Armatur nie massiv gemacht, sondern immer zerteilt, d. h. aus gefirnißten Eisendrähten oder aus gefirnißten Eisenblechen gebildet. Bei dem Ringanker wird also der Eisenkern aus einem Bündel von ringförmig gebogenen Drähten oder aus einer Reihe von ringförmigen Eisenplatten gebildet, die alle senkrecht zur Drehungsachse liegen, in der Richtung der Induktionsströme also keinen metallischen Zusammenhang miteinander haben. Ebenso wird der Eisenzylinder beim Trommelanker aus lauter Eisenscheiben zusammengesetzt, die in der Richtung der Achse keinen metallischen Zusammenhang besitzen. Damit ist eine Hauptquelle für Arbeitsverluste beseitigt.

Fig. 337.



Bei der Drehung des Ankers kommt weiter jede Spule abwechselnd einmal aus der oberen Hälfte des Feldes in die untere. Dabei kehrt sich der Strom in ihr um, indem er durch Null hindurchgeht. Bei dieser Umkehrung des Stromes werden aber Extraströme in der betreffenden Spule selbst und dadurch auch Induktionsströme in den benachbarten Spulen hervorgebracht und zwar um so stärkere, je rascher die Stromumkehrung geschieht und je stärker der in den Ringwindungen fließende Strom selbst ist. Der genauere Vorgang hierbei ist folgender. Die beiden Enden jeder Spule sind ja zu zwei aufeinander folgenden Segmenten des Kommutators geführt, wie in Fig. 337 an einer Spule S gezeigt ist, deren Enden die Kommutatorstücke 1 und 2 bilden. Bei der Rotation des Ankers kommt nun für kurze Zeit eine Bürste B mit den beiden aufeinander folgenden Segmenten in Berührung und die betreffende Spule ist dann kurz geschlossen und aus dem Stromkreis ausgeschaltet, wie in Fig. 337 oben. Im nächsten Moment wird nun bei der Weiterdrehung der Kurzschluß der Spule aufgehoben und sofort sucht jetzt der ganze Ankerstrom in die Spule einzudringen. Dabei aber tritt ein

starker Extrastrom in der Spule auf, so daß der Strom in ihr nicht sofort auf den richtigen Wert ansteigen kann, und es geht daher ein Teil des Stromes durch die Luft in einem Funken F über, der zwischen der Bürste B und dem eben von ihr verlassenen Kommutatorsegment 2 überspringt, wie in Fig. 337 unten. Die Maschine „feuert", wie man sagt. Man kann das Feuern vermeiden, wenn man die Bürste nicht genau an die neutrale Zone legt, sondern noch etwas darüber hinaus in der Richtung der Drehung verschiebt. Denn dann erhält infolge der Einwirkung des Magnetfeldes die kurzgeschlossene Spule schon einen Strom, da sie ja nicht mehr in der neutralen Zone ist, und infolgedessen braucht nun beim Öffnen der Spule der Strom in ihr nicht erst von Null an anzuwachsen, der Grund für das Feuern fällt fort. Wenn das Feuern nicht beseitigt wird, so entstehen Stromverluste und es tritt eine rasche Zerstörung des Kommutators ein.

Wenn man den Anker einer durch einen äußeren Stromkreis geschlossenen Maschine mit der Hand oder durch eine Dampfmaschine dreht, so entsteht in dem Anker, in den Drähten der Magnete und in der äußeren Leitung ein kontinuierlicher Strom. Wenn aber ein von einem Strom durchflossener Leiter in der Nähe eines Magneten sich befindet, so übt, wie wir S. 182 gesehen haben, der Magnet auf den Leiter eine Kraft aus und vice versa, und wenn der Leiter beweglich ist, so sucht er sich unter dem Einfluß dieser Kraft zu bewegen. Also durch den Strom selbst, der in dem bewegten Ankerdraht erzeugt ist, entsteht eine innere Kraft in der Maschine, welche den Anker zu bewegen sucht. Und zwar sucht diese innere Kraft den Anker in umgekehrter Richtung zu drehen, als er zur Erzeugung des in ihm fließenden Stromes gedreht wurde. Das wissen wir aus den früheren allgemeinen Erörterungen, nämlich aus dem Lenzschen Gesetz (S. 212), können es aber auch leicht einsehen, wenn wir an die Folgen denken, die eintreten würden, wenn es nicht so wäre. Drehen wir den Anker der Maschine z. B. ein wenig rechts herum, dann fließt ein Strom durch die Ankerdrähte, durch die Elektromagnetwindungen und durch die äußere Leitung in einer bestimmten Richtung. Würde die nun entstehende innere Kraft zwischen dem Magneten und dem Strom den Anker selbst in derselben Richtung zu drehen suchen, so würde der Ring sich von selbst in derselben Richtung weiter drehen, in welcher wir ihn gedreht haben, es würden die Ströme fortwährend weiter fließen und die Maschine sich fortwährend von selbst weiter drehen, während wir ihr nur eine kleine Bewegung gegeben haben. Es wäre damit das Perpetuum mobile konstruiert, eine Maschine, die nach dem einmaligen Anstoß sich von selbst fortwährend weiter bewegen würde. Ein Perpetuum mobile ist aber nach unseren Naturgesetzen unmöglich. Das Grundgesetz der Natur, das Gesetz von der Erhaltung der Energie, sagt, daß man von keiner Maschine mehr Arbeit gewinnen kann, als man in sie hineingegeben hat, es zeigt also direkt die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile. Daraus folgt, daß die innere Kraft, welche die Magnete auf den Strom im Ankerdraht ausüben, den Anker rückwärts zu drehen sucht, entgegengesetzt der Bewegung, welche wir von außen dem Anker erteilten. Diese innere Kraft ist also eine Widerstandskraft; dadurch, daß in der Maschine der Strom fließt, stemmt sich eine Kraft der Bewegung

des Ankers entgegen und wir müssen fortwährend von neuem Arbeit aufwenden, um diesen Widerstand zu überwinden. Es wird also direkt mechanische Arbeit mittels der dynamoelektrischen Maschinen in Elektrizität verwandelt. Daß zur Erzeugung von elektrischen Strömen in solchen Maschinen Arbeit, und zwar erhebliche Arbeit, aufzuwenden notwendig ist, kann man auch durch direkte Versuche an jeder kleinen Maschine, die man mit der Hand drehen kann, sofort erkennen. Solange die Klemmen der Maschine nicht durch einen äußeren Draht geschlossen sind, so daß kein Strom fließen kann, läßt sich die Maschine ziemlich leicht in Bewegung setzen und halten. Sowie aber der Stromkreis geschlossen wird, so daß also die Ströme fließen und dadurch die innere Widerstandskraft entsteht, geht die Maschine sehr schwer und man muß erhebliche Arbeit aufwenden, um sie zu drehen.

Betrachten wir weiter die Stärke der Ströme und ihre elektromotorische Kraft.

Bei jeder magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschine hängt die elektromotorische Kraft, die durch die Drehung in den Ankerwindungen entsteht, direkt ab von der Zahl der magnetischen Kraftlinien, die in einer Sekunde von allen Drahtwindungen geschnitten werden. Sie hängt also zunächst ab von der Stärke des magnetischen Feldes; je stärker dieses ist, desto größer ist auch die elektromotorische Kraft. Sie hängt ferner davon ab, wie der Eisenkern des Ankers gegen die Pole der Magnete liegt. Je näher der Anker an diesen ist, je besser und kräftiger er magnetisch induziert wird, desto stärker sind die entstehenden Induktionsströme. Ferner hängt die elektromotorische Kraft ab von der Drehungsgeschwindigkeit des Ankers. Je rascher der Anker sich dreht, in um so kürzerer Zeit werden die Induktionsströme induziert, um so größer ist ihre elektromotorische Kraft. Bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen ist die elektromotorische Kraft einer solchen Maschine direkt proportional der Tourenzahl des Ankers (in einer Minute z. B.). Endlich hängt die elektromotorische Kraft noch wesentlich ab von der Zahl der Windungen auf dem Eisenkern. Die elektromotorische Kraft wächst direkt mit der Zahl der Windungen auf dem Induktor. Ein Ring, der mit 200 Windungen versehen ist, gibt unter sonst gleichen Umständen eine doppelt so große elektromotorische Kraft wie ein Ring, der nur mit 100 Windungen versehen ist.

Man hat es daher im allgemeinen bei einer Maschine von bestimmter Form (bestimmtem Typus) in der Hand, durch die Zahl der Ankerwindungen und durch die Tourenzahl, die man verändern kann, jede beliebige elektromotorische Kraft zu erzeugen.

In Bezug auf die elektromotorische Kraft findet aber nun ein wesentlicher Unterschied zwischen den magnetelektrischen Maschinen oder den Dynamomaschinen mit Fremderregung und den dynamoelektrischen Maschinen mit Eigenerregung statt.

Betrachten wir zuerst magnetelektrische Maschinen oder Dynamomaschinen mit Fremderregung. Bei diesen ist die Stärke der Magnete unveränderlich. Die elektromotorische Kraft hängt also ab von der Stärke der Magnete, der Tourenzahl und der Lage und Windungszahl des Induktors, gar nicht vom äußeren Widerstand.

Bei gegebener Konstruktion der Maschine und gegebener Tourenzahl ist die elektromotorische Kraft immer dieselbe, wie groß oder wie klein auch der Widerstand des äußeren Stromkreises sei. Die Stromstärke in dem ganzen Kreise hängt aber natürlich von dem gesamten äußeren und inneren Widerstand ab.

Die elektromotorische Kraft treibt die Elektrizität durch den ganzen äußeren und inneren Stromkreis. Ein Teil dieser elektromotorischen Kraft dient dazu, den inneren, der andere, den äußeren Widerstand zu überwinden. An den Klemmen der Maschine, an welche der äußere Widerstand angelegt wird, herrscht also eine Spannung, welche kleiner ist als die gesamte elektromotorische Kraft, weil sie den Strom eben nur noch durch den äußeren Widerstand zu treiben braucht. Diese Spannung nennt man die Klemmenspannung der Maschine. Erinnern wir uns an den Begriff des Spannungsverlustes, den wir früher eingeführt haben (S. 68). Der Spannungsverlust auf einem Drahtstücke von bestimmtem Widerstand ist immer gleich dem Produkt aus der Stromstärke und diesem Widerstand. Da nun die elektromotorische Kraft der Maschine ganz dazu verbraucht wird, den Strom durch den ganzen inneren und den ganzen äußeren Widerstand zu treiben, so ist die elektromotorische Kraft gleich dem Spannungsverlust auf dem ganzen Wege, also gleich dem Spannungsverlust im inneren und dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis zusammen. Die Klemmenspannung dagegen hat den Strom nur durch den äußeren Stromkreis zu treiben. Sie ist also gleich dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis allein. Daraus folgt, daß die Klemmenspannung um so viel kleiner ist als die elektromotorische Kraft, als der Spannungsverlust im Innern der Maschine selbst beträgt.

$$\text{Elektromotorische Kraft} = \text{Klemmenspannung} + \text{innerer Spannungsverlust.}$$

Bei einer magnetelektrischen Maschine ist nun zwar die gesamte elektromotorische Kraft, aber nicht die Klemmenspannung unabhängig vom äußeren Widerstande. Ist die Maschine ungeschlossen, also der äußere Widerstand zwischen den Klemmen unendlich groß, so ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft. Denn da bei ungeschlossener Maschine überhaupt kein Strom fließt, so ist der Spannungsverlust im Innern der Maschine gleich Null. Sind dagegen die beiden Klemmen durch einen sehr kleinen Widerstand geschlossen, so ist die Klemmenspannung sehr klein. Denn dann ist die Stromstärke sehr groß, also der Spannungsverlust im Innern auch sehr groß. Die Klemmenspannung ist immer gleich dem Produkt aus dem äußeren Widerstande und der Stromstärke.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei den eigentlichen Dynamomaschinen, welche Selbsterregung haben, bei denen also der Strom der Maschine selbst erst die Magnete erregt. In diesen ist die Stärke der Magnete nicht unveränderlich, ein für allemal gegeben, sondern sie hängt ab von der Stärke des in der ganzen Leitung fließenden Stromes, also auch von dem äußeren Widerstand. Von der Stärke der Magnete hängt aber wieder die elektromotorische Kraft der Induktionsströme

ab. Bei den Dynamomaschinen hängt also die elektromotorische Kraft wesentlich ab von der Größe des äußeren Widerstandes, bei jeder Änderung des äußeren Widerstandes ändert sich auch die elektromotorische Kraft der Maschine. Wird z. B. der äußere Widerstand größer, so wird zuerst die Stromstärke kleiner, dadurch werden die Magnete schwächer und dadurch wird wieder die elektromotorische Kraft kleiner. Und diese bewirkt für sich dann wieder eine Verringerung der Stromstärke in dem ganzen Kreise. Also die Dynamomaschinen sind in Bezug auf die in ihnen erzeugte elektromotorische Kraft sehr empfindlich gegen Änderungen im äußeren Schließungskreis.

Ist eine Hauptstrommaschine ungeschlossen, so mag sie noch so rasch gedreht werden, es entsteht in ihr überhaupt keine elektromotorische Kraft, abgesehen von der geringen, die von dem remanenten Magnetismus der Elektromagnete herrührt. Denn solange die Maschine ungeschlossen ist, fließt kein Strom, folglich werden die Elektromagnete auch nicht erregt und daher kein Induktionsstrom erzeugt. Es zeigt sich also auch an den Polen keine freie Elektrizität. Ferner erkennt man aus dem Obigen, daß eine solche Dynamomaschine einen sehr viel stärkeren Strom liefern muß, wenn der äußere Widerstand klein, als wenn er groß ist. Die Stärke des Stromes nimmt nicht bloß im umgekehrten Verhältnis des Widerstandes zu, wie er es nach dem Ohmschen Gesetz tun würde, wenn die elektromotorische Kraft ungeändert bliebe, sondern viel rascher, weil auch die elektromotorische Kraft von dem Widerstande abhängt.

Von wesentlicher Bedeutung für die Kenntnis von Maschinen ist es, zu wissen, in welcher Weise sich die Klemmenspannung (der Spannungsunterschied an den beiden Polklemmen) und in welcher Weise sich die Stromstärke mit dem äußeren Widerstand ändert. Die verschiedenen Schaltungsweisen der Dynamomaschinen bringen gerade darin wichtige Verschiedenheiten hervor, die wir aber erst später besprechen wollen.

Man gibt bei jeder Maschine gewöhnlich, um sie zu charakterisieren, an, welches ihre normale Tourenzahl sein soll und wie groß in diesem Falle die höchste zulässige Stromstärke in Ampere (bei der die Erwärmung der Drähte noch einen zulässigen Wert hat, ca. 70° C.) und die zugehörige Klemmenspannung in Volt ist. Das Produkt aus der Klemmenspannung in die Stromstärke gibt den elektrischen Effekt im äußeren Stromkreis, und man drückt diesen gewöhnlich in Watt (Volt-Ampere) aus. Also eine Maschine z. B., welche bei 60 Volt Klemmenspannung 80 Ampere gibt, erzeugt im äußeren Stromkreis einen Effekt von 4800 Watt. Da ein Kilowatt (nach S. 115) = 1,36 Pferdekräften ist, so kann man den Effekt auch direkt in Pferdekräften ausdrücken. Obige Maschine würde danach im äußeren Stromkreis $4{,}8 \times 1{,}36 = 6{,}5$ PS liefern. Die gesamte Arbeit, die man (durch einen Gasmotor oder eine Dampfmaschine oder eine Turbine) auf die Maschine pro Sekunde übertragen muß, ist natürlich größer. Denn sie muß nicht nur den Effekt im äußeren Stromkreis liefern, sondern sie treibt auch den Strom im Innern der Maschine und sie überwindet die Reibungen der Maschinenachse in ihren Lagern u. s. w. Der Effekt im äußeren Stromkreis aber

ist der wichtigste Teil dieser Gesamtarbeit. Denn dieser kann eben nutzbar verwendet werden zum Brennen von Lampen, Treiben von Elektromotoren u. s. w. Wenn man den Effekt im äußeren Stromkreis mit dem gesamten Effekt (Arbeit pro Sekunde) vergleicht, welche man zum Drehen der Dynamomaschine verwenden muß, so bekommt man ein direktes Maß für die Güte der Konstruktion der Maschine. Man nennt deshalb auch dieses Verhältnis:

$$\frac{\text{elektrischer Effekt im äußeren Stromkreis}}{\text{gesamter aufgewendeter Effekt}}$$

das absolute Güteverhältnis oder auch den Wirkungsgrad der Maschine. Dies ist also eine für die Beurteilung der Maschine sehr wesentliche Größe.

Die wesentlichen Konstruktionsgrundsätze, durch welche man das absolute Güteverhältnis von Maschinen allmählich sehr groß zu machen gelernt hat, haben sich aus theoretischen und praktischen Untersuchungen herausgebildet.

Zunächst ist klar, daß die Größe der erzeugten elektromotorischen Kraft unter sonst gleich bleibenden Verhältnissen immer abhängt von der Stärke des magnetischen Feldes, innerhalb dessen der Anker, die Armatur, rotiert. Es kommt also darauf an, die Stärke dieses Feldes möglichst groß zu machen. Man gewinnt dabei, wie wir sehen werden, noch andere Vorteile. Deshalb wird bei allen Konstruktionen das Hauptaugenmerk auf die magnetische Disposition der Maschinen gelegt und gerade darin unterscheiden sich die jetzt gebauten Maschinen wesentlich von den ersten Dynamomaschinen aus den Achtzigerjahren des vorigen Jahrhunderts. Für die Stärke des magnetischen Feldes, das aus den Magnetschenkeln und dem magnetisch induzierten Eisenkern des Ankers gebildet wird, ist die Hauptforderung, daß der magnetische Widerstand (S. 171) möglichst klein sei. Dazu ist zunächst notwendig, daß alle Eisenteile möglichst großen Querschnitt haben. Wir wissen ja aus dem Ohmschen Gesetz für den Magnetismus (S. 172), daß um so mehr Kraftlinien durch das Eisen gehen, je größer der Querschnitt desselben ist. Also ist ein Hauptprinzip der neuen Konstruktionen: große Eisenquerschnitte! Es müssen erstens die Magnetschenkel selbst möglichst kräftig sein, es müssen aber auch die sie verbindenden Rückplatten genügend großen Querschnitt haben. Ferner wird der magnetische Widerstand solcher Elektromagnete bedeutend erhöht, wenn zwischen den Schenkeln und den Rückplatten keine guten Verbindungen, sondern Luftzwischenräume sind. Man stellt daher häufig das ganze Schenkeleisen aus einem Stücke Gußstahl oder aus Flußeisen her. Wenn man Schmiedeeisen benutzt, so legt man ein Hauptaugenmerk darauf, daß alle Teile der Magnete gut verschraubt und sorgfältig aneinander gefügt sind. Ebenso muß der Anker, um stark magnetisch zu werden, genügende Dicke haben. Aber das Ankereisen soll, wie wir bereits gesehen haben, nicht aus einem Stücke bestehen, wegen der Foucaultschen Ströme. Es soll vielmehr sorgfältig zerteilt sein und wird deshalb gewöhnlich aus gefirnißtem Eisendraht oder Eisenband oder Eisenblechen zusammengesetzt. Der Anker wird gewöhnlich

aus dem magnetisch vorzüglichen Schmiedeeisen, das Magnetgestell aus Gußstahl oder dem billigeren Gußeisen hergestellt, wobei die Dimensionen des Magnetgestells bei gleicher Leistung im letzteren Fall bedeutend größer sein müssen, wie im ersten Fall.

Für die Stärke des magnetischen Feldes ist weiter notwendig, daß der Zwischenraum zwischen dem Eisen der Schenkel und dem Eisen des Ankers so klein wie möglich sei. Wenn die Drahtwindungen auf den Anker aufgewunden werden, wie in Fig. 338, so wird durch den Raum, den sie einnehmen, an sich schon der Abstand des Ankers von den Feldmagneten vergrößert, abgesehen von dem Spielraum, den man für die ungehinderte Rotation immer zwischen Anker und Feldmagneten lassen muß. Man ist infolgedessen davon abgekommen, solche glatte Anker herzustellen. Vielmehr bildet man jetzt den Anker gewöhnlich als Zahnanker oder Nutenanker, d. h. man gibt dem Anker in seiner Längsrichtung Zähne oder Nuten, in welche die Drähte eingelegt werden. Fig. 339 gibt die Ansicht eines solchen Zahnankers.

Fig. 338.

Fig. 339.

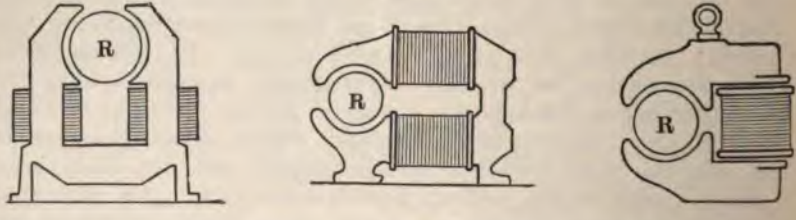
Fig. 340.

Fig. 341.

Man ist sogar dazu übergegangen, die Drähte in Löcher einzuziehen, die in das Eisen eingebohrt wurden. Einen solchen Lochanker zeigt Fig. 340. Doch ist es vorteilhaft, die Löcher oben zu öffnen, wie in Fig. 341, und derartige Armaturen werden jetzt vielfach angewendet.

Für die möglichst vollkommene Ausnutzung einer Maschine ist es ferner notwendig, daß die erzeugten magnetischen Kraftlinien möglichst

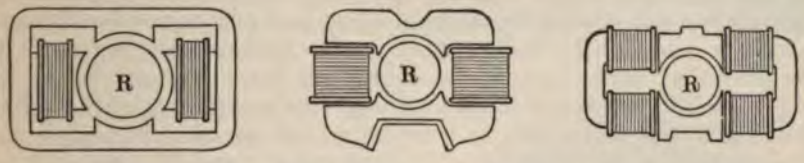
Fig. 342.



wenig Streuung besitzen, also möglichst vollständig den Anker induzieren. Um dies zu erreichen, hat man dem Magnetgestell verschiedene Formen gegeben, von denen einige in den Fig. 342 und 343 dargestellt sind. Bei den Maschinen in Fig. 342 hat das Magnetgestell die Form eines stehenden oder liegenden Hufeisens, in Fig. 343 ist das Eisengestell ringförmig geschlossen. Man kann die Magnete dieser Art als Ringmagnete bezeichnen. Die mittelste Form in Fig. 343 wird als Manchestertype bezeichnet.

Bei der Ringform des Magnetgestells kann man nun auch statt bloß zweier Magnetpole eine beliebige Anzahl auf dem Ring anbringen und man unterscheidet danach vierpolige, sechspolige u. s. w. vielpolige Maschinen. Fig. 344 gibt das Schema zweier solcher vierpoligen Maschinen, bei welchen die vier abwechselnden Nord- und Südpole auf einem Ringgestell angebracht sind und den innen liegenden Anker induzieren.

Fig. 343.



Diese vielpoligen (multipolaren) Maschinen wurden zuerst ebenfalls von Gramme konstruiert. Er wendete also statt zweier induzierenden Magnetpole deren mehrere, 4, 6 oder noch mehr an, so daß immer entgegengesetzte Pole aufeinander folgen. Mitten zwischen zwei entgegengesetzten Magnetfeldern befindet sich dann immer eine neutrale Zone, oder vielmehr, wie wir wissen, nicht genau in der Mitte, sondern etwas verschoben in Richtung der Rotation des Ankers. Daher sind in einer vierpoligen Maschine, wie in Fig. 345, vier neutrale Zonen vorhanden, an denen die Bürsten schleifen, an einer sechspoligen sechs u. s. w. Je zwei gegenüberliegende Bürsten kann man durch einen besonderen Stromkreis verbinden, so daß man also aus der in der Figur gezeichneten Maschine zwei besondere Stromkreise abnehmen könnte. Gewöhnlich aber verbindet man die entsprechenden Bürsten entweder hintereinander oder meistens nebeneinander und leitet von den freien Endbürsten den Strom nach außen. Die vielpoligen Maschinen werden nur für größere Leistungen konstruiert.

Fig. 344.

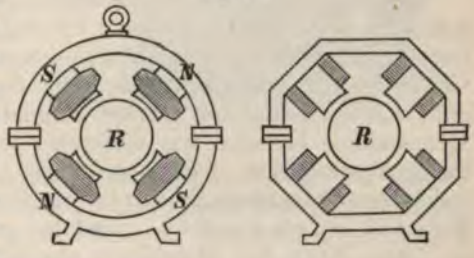
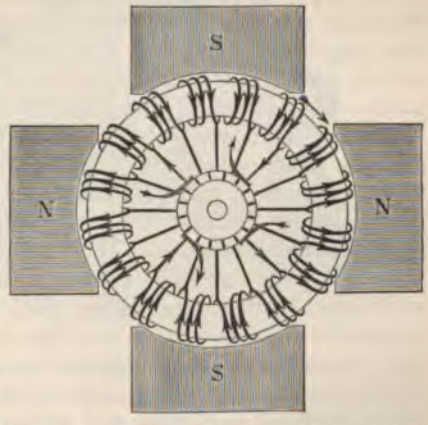


Fig. 345.



Man klassifiziert allgemein die Maschinen nach der Anzahl der Kilowatt, die sie leisten können, wobei 1 Kilowatt nach S. 115 ungefähr gleich 1,36 Pferdekräften ist. Maschinen bis zu 10 Kilowatt werden fast immer zweipolig gebaut, solche bis zu 15 Kilowatt meistens. Von 15 bis etwa 120 Kilowatt baut man vierpolige, von 120 bis 300 Kilowatt sechspolige

Maschinen u. s. w. An den Grenzen dieser Bezirke kann man natürlich ebenso vorteilhaft die eine oder die andere Art benutzen.

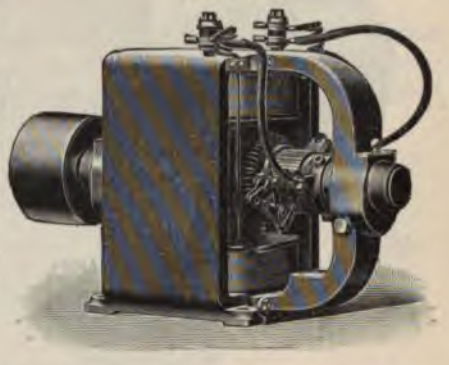
Während in den ersten zwei Jahrzehnten der Elektrotechnik der Bau guter Dynamomaschinen mehr Sache des konstruktiven Geschicks und des intuitiven Blicks war, ist das jetzt, nachdem eine große Anzahl theoretischer und praktischer Studien über die Verhältnisse der Dynamomaschinen ausgeführt wurden, anders. Heute kann der Ingenieur für jede Maschine, deren Leistung in Bezug auf Spannung und Strom ihm vorgeschrieben ist, durch Rechnung von vornherein die einzelnen Konstruktionsdetails feststellen und er kann mit gleicher Sicherheit eine Maschine vorher berechnen, die 5 Volt Spannung und 50 Ampere Strom geben soll, wie eine solche, die 500 Volt Spannung und 1000 Ampere leisten soll. Dabei ist der Wirkungsgrad der Maschinen oder das absolute Güteverhältnis (S. 369) ein recht hohes, es beträgt zwischen 80 Prozent bei kleinen Maschinen und 93 Prozent bei großen.

Das Magnetgestell der Maschinen wird meistens aus Gußeisen hergestellt, nur die Pole selbst und die Polschuhe werden aus Gußstahl verfertigt. Bei transportablen Maschinen dagegen, bei denen es auf geringes Gewicht ankommt, macht man auch das ganze Magnetgestell aus Stahlguß, welcher bei gleich starker Magnetisierung nur etwa halb so große Querschnitte braucht, wie Gußeisen, so daß das Gewicht der Maschine dadurch wesentlich verringert wird. Die Kraftlinienzahl (S. 170 ff.), welche pro Quadratzentimeter in dem Eisengestell herrscht, die sogenannte Kraftliniendichte, wird bei gußeisernen Maschinen gewöhnlich zu 7000—8000, bei Maschinen aus Stahlguß zu 15 000 angenommen. Der Anker wird, wie gesagt, aus dünnen Blechscheiben zusammengesetzt und diese werden stets aus Schmiedeeisen verfertigt, dessen magnetische Eigenschaften so gut sind, daß man im Ankerkern 12 000—14 000 Kraftlinien pro Quadratzentimeter, in den Zacken des Ankers sogar 16 000 bis 18 000 rechnet. Nachdem man sich über die Dimensionen des Ankers der Maschine aus der geforderten Leistung informiert hat, kann man aus den eben gegebenen Zahlen die Zahl der Amperewindungen (S. 169 f.) berechnen, welche man auf dem Anker aufbringen muß, um die verlangte Kraftliniendichte herzustellen. Um die Erwärmung der Drähte durch Joulesche Wärme in mäßigen Grenzen zu halten, wird die Drahtdicke so gewählt, daß pro Ampere etwa $^1/_2$ Quadratmillimeter besten Kupferdrahts benutzt wird. Aus dem von der Maschine verlangten Strom kann man daher die Dicke der Drähte oder Stäbe berechnen, welche auf dem Anker untergebracht werden sollen. Die Erwärmung der Drähte durch den Strom wird gemildert durch die Luftströmungen, die bei dem Gang der Maschine auftreten. In manchen Fällen muß man aber die Maschinen, etwa wenn schädliche Säuredämpfe in dem Raum herrschen, in dem sie aufgestellt sind, oder wenn Staub und Schmutz in sie eindringen kann, vollständig einkapseln. In diesem Fall wird natürlich die Erwärmung der Maschine unter sonst gleichen Umständen viel größer, oder vielmehr, man kann solche eingekapselte Maschinen bei gleicher Größe nur für geringere Ströme herstellen.

Nach diesen Vorbemerkungen beschreiben wir einige der in Deutschland fabrizierten und verbreiteten Maschinen. Es haben sich allmählich *wenige ganz* bestimmte Typen als die vorteilhaftesten erwiesen.

Von den Siemens-Schuckertwerken in Berlin und Nürnberg werden die kleinen Dynamos von 1 bis 20 Kilowatt jetzt in der Form verfertigt, welche aus Fig. 346 zu erkennen ist (Modell G c). Es sind das zweipolige Maschinen mit Trommelanker, bei denen die Magnetpole oben und unten in einem viereckigen Rahmen angebracht sind und mit ihren breiten Polschuhen den Anker umfassen. Auf der linken Seite sieht man eine Riemenscheibe, durch welche die Dynamo von der Antriebmaschine getrieben wird. Der Wirkungsgrad beträgt bei den kleinsten dieser Maschinen 73 Proz., bei den größten 88 Proz. Die Maschinen werden gewöhnlich als Nebenschluß-, selten als Hauptstrom- oder Compoundmaschinen gewickelt. Von den Bürsten aus gehen zwei dicke Drähte zu den zwei Schrauben auf der oberen Eisenplatte der Maschine, in welche dann die Enden der äußeren Leitung eingeschraubt werden.

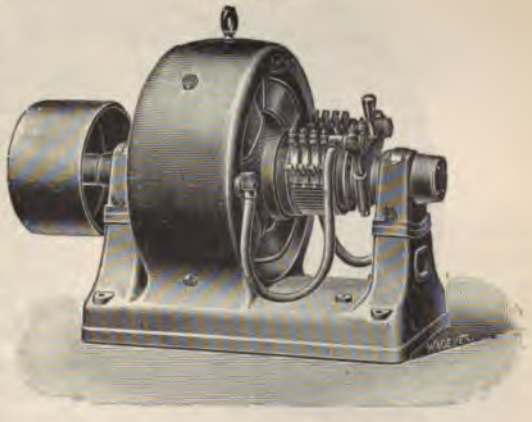
Fig. 346.



Die Anker dieser Maschinen müssen rasch laufen, um ihre normale Spannung zu geben, für die sie gewickelt sind, die kleineren Maschinen brauchen zirka 1500 Umdrehungen pro Minute, die größten zirka 800 Umdrehungen. Sie werden gewöhnlich durch Riemen von einer Dampfmaschine oder Gasmaschine getrieben.

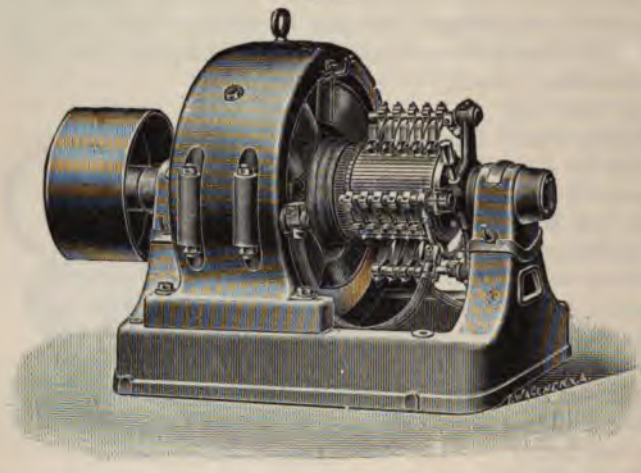
Eine zweite Maschinengattung (GM), welche von den Siemens-Schuckertwerken gebaut wird, ist durch Fig. 347 und 348 gekennzeichnet. Diese Maschinen haben ein ringförmiges Magnetgestell. Sie werden für Leistungen von 2 Kilowatt an bis zu vielen hundert Kilowatt gebaut. Die kleineren dieser Maschinen (Fig. 347) sind, wie man sieht, vierpolig, die größeren bis zu 200 Kilowatt Leistung (Fig. 348) sind sechspolig. Der Kommutator nimmt je nach der Größe der Maschine an Breite zu, da man für starke Ströme immer mehr Bürsten in eine Reihe setzt, um die starken Ströme abzunehmen. Der Anker ist trommelförmig. Da die Magnete außerhalb des Ankers liegen, so bezeichnet man solche Maschinen zum Unterschied von den nachher zu beschreibenden auch als Außenpolmaschinen. Der Wirkungsgrad ist bei den kleinsten dieser Maschinen 80 Proz. und steigt bei den größten bis zu 92 Proz. Während die kleinste Maschine von 2 Kilowatt Leistung

Fig. 347.



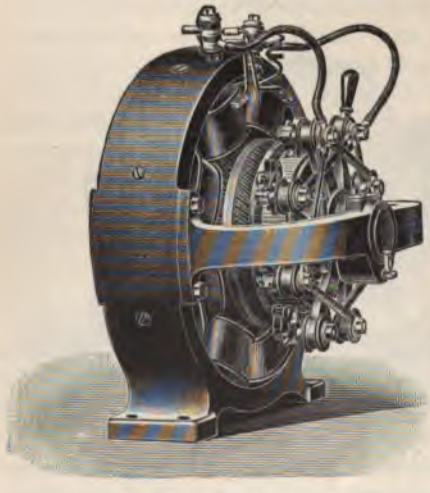
1700 Touren pro Minute machen muß, um ihre normale Spannung (je nach der Wickelung 110, 220 oder 440 Volt) zu erreichen, machen die 200-Kilowattmaschinen nur 540 Touren.

Fig. 348.



Dieselben Maschinen werden auch in sehr viel größeren Dimensionen mit sehr vielen Polen für sehr große Leistungen hergestellt. Solche große Maschinen aber werden gewöhnlich nicht durch Riemen von einer Dampfmaschine, Gasmaschine oder Turbine angetrieben, sondern sie werden direkt auf die Achse dieser Antriebmaschinen gesetzt, sind also mit der Antriebmaschine gekuppelt. Unter Umständen verbindet man auch kleinere Dynamos, namentlich auf Schiffen, direkt mit der Dampfmaschine. Man bezeichnet sie dann als Dampfdynamos, oder wenn sie mit einer Dampfturbine gekuppelt sind, als Turbodynamos. Da die Antriebmaschinen gewöhnlich geringe Tourenzahlen haben, so müssen also die Dynamos zu diesem Zweck auch für geringe Tourenzahlen konstruiert sein, also im allgemeinen viele Pole haben. Eine solche vielpolige Maschine zum Anbau an Dampfmaschinen oder Gasmotoren zeigt Fig. 349 (Modell V). Die allgemeine Einrichtung derselben geht aus der Figur klar hervor. Die abgebildete Maschine ist 12polig, hat also auch 12 Bürstenreihen am Kommutator. Die Maschine ist besonders flach gebaut, der Anker ist verhältnismäßig sehr kurz. Ihre Leistungen gehen von 1,2 bis 130 Kilowatt, ihr Wirkungsgrad steigt mit der Größe von 72 bis 91 Proz. Dabei brauchen die kleinsten Maschinen 750 Touren, die größte bloß 200, um ihre maximale Leistung zu liefern.

Fig. 349.

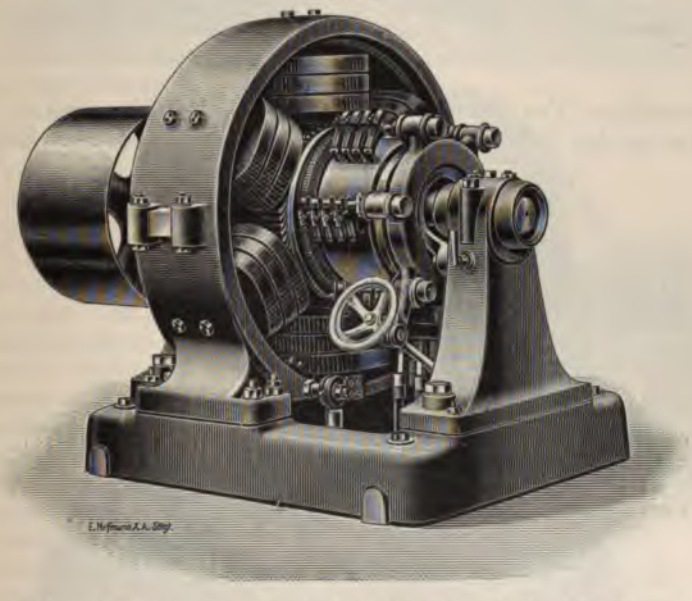


In vielen von Siemens & Halske hergestellten Anlagen ist noch eine

andere Form der Dynamomaschinen zu sehen, welche deswegen auch noch beschrieben werden soll, obwohl dieses Modell jetzt nicht mehr hergestellt wird. Es sind das die sogenannten Innenpolmaschinen, die deswegen so benannt sind, weil bei ihnen die Magnete nicht außerhalb des Ankers angebracht sind, sondern im Innern desselben. Zu dem Zweck ist für den Anker die Form des Ringes notwendig. Derartige Maschinen wurden hauptsächlich für sehr große Leistungen angefertigt. Der Ring muß schon eine gehörige Größe haben, um zweckmäßig die Magnete aufnehmen zu können.

Eine wesentliche Vereinfachung wurde bei solchen großen Maschinen dadurch erzielt, daß man sie ganz ohne besonderen Kommutator konstruierte. Der Ring besteht nämlich dann aus blanken, gut abgedrehten

Fig. 350.

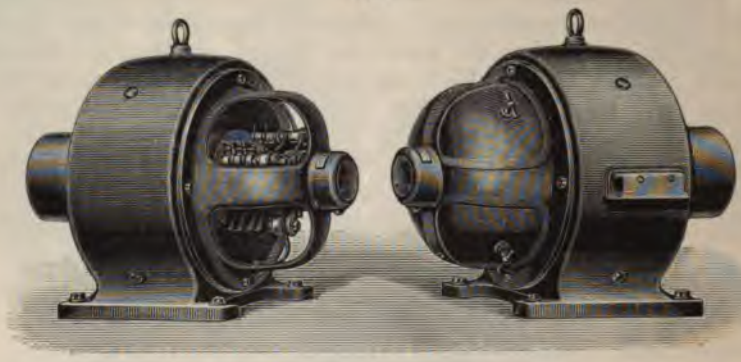


Kupferstreifen, die voneinander isoliert sind, und die Bürsten schleifen direkt auf dem Ring. Die Innenpolmaschinen wurden insbesondere für elektrische Zentralanlagen gebaut, und zwar in großen Dimensionen, so daß eine Maschine Hunderte von Pferdekräften in elektrische Energie umsetzen mußte.

Nach dieser Besprechung der Maschinen der Siemens-Schuckertwerke wenden wir uns zur Betrachtung derjenigen Maschinen, welche von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) in Berlin gebaut werden. Auch diese Dynamomaschinen besitzen einen Trommelanker. Es werden jetzt hauptsächlich mehr Maschinen eines einzigen Typus, EG-Maschinen, gebaut, welche je nach der Größe zwei- oder mehrpolig sind, und bei denen das Hauptaugenmerk auf eine in jeder Beziehung vollendete mechanische und elektrische Disposition gelegt ist. Fig. 350 zeigt eine derartige 6polige Maschine für 50 bis 100 Pferde-

kräfte offen. Man erkennt den breiten Trommelanker, die 6 auf dem eisernen Ring sitzenden Magnetpole, den breiten Kommutator mit den

Fig. 351.



6 Bürstenreihen. Von demselben Typus sind die Maschinen von $^1/_2$ Pferdekraft bis zu den größten. Sie werden offen oder gekapselt hergestellt.

Fig. 352.

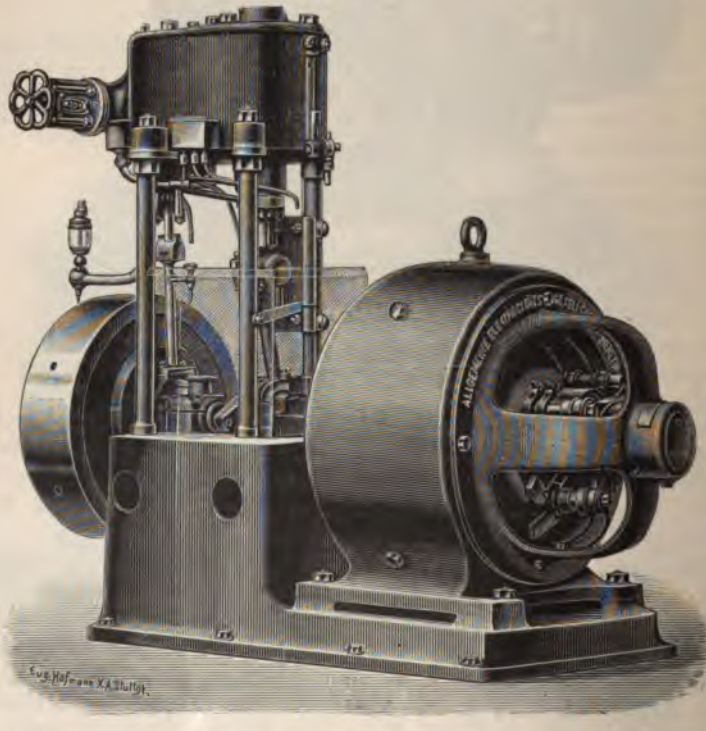


Fig. 351 gibt eine Ansicht dieser Maschinen, bei denen das Innere zwar nicht erkennbar ist, die aber zeigen, wie die Maschinen auf einfache Weise

mehr oder minder vollständig gekapselt werden können. Die Maschinen werden für alle Spannungen bis zu 600 Volt gewickelt. Die kleineren von ihnen, die unter 1 Pferdekraft benötigen, brauchen dazu 1800 bis 1900 Touren, die größten für zirka 100 Pferde brauchen 600 bis 700 Touren. Auch diese Maschinen können entweder für Riemenantrieb oder zur direkten Verbindung mit der Dampfmaschine eingerichtet werden. Fig. 352 zeigt eine solche mit der Dampfmaschine direkt verbundene EG-Maschine für 1 bis 20 Kilowatt Leistung.

Außer den eben genannten beiden weitaus bedeutendsten Fabriken Deutschlands liefern noch andere große Gesellschaften (z. B. Lahmeyer in Frankfurt a. M., Schwarzkopff in Berlin) Gleichstrommaschinen, die wir aber hier, um nicht zu ausführlich zu werden, übergehen müssen. Die Maschinen der verschiedenen Fabriken unterscheiden sich jetzt im allgemeinen und speziellen Aufbau verhältnismäßig wenig, weil die theoretischen Grundlagen, nach denen sie ausgeführt werden, mit großer Sicherheit bekannt sind.

Fig. 353.

Es seien daher bloß noch die kleinen, für Lehrzwecke geeigneten Maschinen erwähnt, wie sie unter anderen von C. und E. Fein in Stuttgart hergestellt werden. Es sind das Dynamomaschinen für Handbetrieb, welche zu Studienzwecken und für Demonstrationen recht viel benutzt werden. In Fig. 353 ist eine kleine Maschine abgebildet, deren Anker durch das Rad mittels Schnurlaufs gedreht wird. Die beiden Magnetpolschenkel sind schief gestellt, ihre Polschuhe umfassen den Ringanker, an dem man nach vorn auch den Kommutator sieht. Diese Demonstrationsmaschinen werden entweder mit starkem Draht, oder mit mittlerem oder mit feinerem gewickelt und liefern bei 2400 Touren in der Minute je nach den drei Wickelungsarten Spannungen von 3,2, 7,5, 22 Volt und Stromstärken von 24, 11, 4 Ampere. Die mittlere Wickelung ist am meisten zu Versuchen geeignet. Man kann mit ihr elektrolytische Prozesse ausführen, Drähte schmelzen und Glühlampen zum Leuchten bringen.

Mit dieser speziellen Beschreibung einer Anzahl von Dynamomaschinen für Gleichstrom konnte und wollte natürlich durchaus keine Vollständigkeit erstrebt werden. Die Maschinen der einzelnen Fabriken haben keine wesentlichen Vorzüge voreinander. Die Hauptsache bleibt immer die richtige magnetische Disposition, also insbesondere die Aufgabe, den magnetischen Widerstand der Maschine möglichst klein zu machen und Streuungen zu vermeiden, ferner die Gestaltung und Wicke-

lung des Ankers, die zweckmäßige Konstruktion des Kommutators, die leichte Verstellbarkeit der Bürsten, die sorgfältige Lagerung der Achse, die sichere Schmierung der Lager, die Ausbalancierung aller beweglichen Teile, die leichte Zugänglichkeit und Reparaturfähigkeit. In dieser Hinsicht erreichen die deutschen Dynamomaschinen bewährter Firmen alles Erreichbare.

Alle Maschinen, die schnell rotieren und von starken Strömen durchflossen werden, erhitzen sich erstens durch gewöhnliche Reibung, zweitens durch die Joulesche Wärme, welche durch den Strom in den Drähten erzeugt wird, ferner aber dadurch, daß in den Magneten durch das fortwährende Ummagnetisieren infolge der Hysteresis (S. 167) Wärme entsteht, und daß die Ströme, welche in den bewegten Teilen entstehen, die Wirbelströme (S. 222), sich in Wärme umsetzen. Alle Konstrukteure nehmen daher darauf Bedacht, daß einerseits die Ursachen dieser Erwärmung möglichst verringert werden, daß also insbesondere das Ankereisen sorgfältig zerteilt ist (S. 364), und daß andererseits durch die Maschine, während sie im Gange ist, stets ein kräftiger Luftstrom hindurchstreicht, welcher sie fortwährend abkühlt, wenn sie sich erwärmt. Die Maximalstromstärke, die eine Maschine leisten darf, ohne sich zu stark zu erhitzen, wird von den Konstrukteuren bei jeder Maschine angegeben.

Es ist nun an der Zeit, daß wir die Unterschiede, welche zwischen Hauptstrommaschinen, Nebenschlußmaschinen und Compoundmaschinen in ihrem Verhalten bestehen, näher untersuchen. Diese Unterschiede beziehen sich hauptsächlich darauf, wie sich die Klemmenspannung und die Stromstärke dieser Maschinen ändern, wenn man den Widerstand im äußeren Stromkreis ändert. Wenn der Widerstand des äußeren Stromkreises wächst, von einem sehr kleinen Werte an bis zu einem sehr großen, wie ändert sich damit die Klemmenspannung der Maschinen und wie ändert sich die Stromstärke im Hauptstromkreis?

1. Nehmen wir also erst eine Dynamomaschine mit Fremderregung, bei der die Magnete durch einen besonderen Strom von außen erregt werden, so daß also der Magnetismus unabhängig von dem äußeren Widerstand bleibt. Dann ist die elektromotorische Kraft der Maschine immer (bei gleichbleibender Tourenzahl) dieselbe, wie groß oder wie klein auch der äußere Widerstand sei. Die Klemmenspannung aber ist für verschiedene Widerstände verschieden. Sind die Klemmen durch einen ganz geringen Widerstand verbunden, so ist die Differenz ihrer Spannungen sehr klein. Je größer der äußere Widerstand wird, desto mehr nimmt die Klemmenspannung zu, und bei unendlich großem Widerstand, d. h. bei offenem Stromkreis, ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft der Maschine. Die Klemmenspannung nimmt also bei wachsendem äußeren Widerstand stets zu, erst rasch, dann langsamer und nähert sich dem Grenzwert der konstanten elektromotorischen Kraft.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis erhält man in Ampere durch Division der Klemmenspannung durch den äußeren Widerstand. Sie ist sehr groß, wenn der äußere Widerstand sehr klein ist, und nimmt

mit wachsendem Widerstand rasch ab und wird 0, wenn der Widerstand unendlich groß ist. Wenn die Pole einer Stromquelle durch einen sehr geringen äußeren Widerstand verbunden werden, so sagt man, es herrsche ein Kurzschluß. Durch einen solchen wird also die Stromstärke außerordentlich groß.

2. Nehmen wir zweitens eine Dynamomaschine, bei der die Magnete im Nebenschluß liegen, also durch einen Zweigstrom erregt werden. Hier tritt dasselbe Verhalten für die Klemmenspannung ein, wie bei einer fremderregten Maschine, und zwar in verstärktem Maße. Denn wenn der äußere Widerstand sehr klein ist, so geht der Hauptstrom durch diesen, der Zweigstrom um die Magnete ist sehr schwach und daher sind die Magnete sehr schwach, woraus folgt, daß die elektromotorische Kraft sehr klein und infolgedessen auch die Klemmenspannung sehr klein ist. Wird dagegen der äußere Widerstand immer größer, so nimmt die Stärke der Magnete stets zu, da dann ein immer größerer Teil des Stromes um die Magnete fließt, und infolgedessen wächst auch die elektromotorische Kraft und die Klemmenspannung. Also auch hier nimmt die Klemmenspannung bei wachsendem äußeren Widerstand stets zu, erst rasch, dann langsamer, und wird endlich nahezu konstant.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis ist anfangs (bei kleinem Widerstand) gering, weil die Magnete schwach sind. Sie wächst dann, wenn der Widerstand größer wird, weil die Magnete stärker werden. Man hat hier also das eigentümliche Verhalten, daß die Stromstärke in einem Stromkreis wächst, wenn der Widerstand wächst, wobei sie ja eigentlich abnehmen sollte. Das kommt natürlich daher, daß dabei die Magnete stärker erregt werden, also die elektromotorische Kraft der Maschine steigt. Wenn aber der äußere Widerstand noch mehr wächst, so nimmt die Stromstärke wieder ab. Die Stromstärke erreicht also bei einem bestimmten äußeren Widerstand einen maximalen Wert und nimmt dann wieder ab, um bei sehr großem Widerstand nahezu gleich Null zu werden.

3. Drittens betrachten wir eine Hauptstrommaschine (Serienmaschine). Hierbei ist bei geringem äußeren Widerstand der ganze Strom sehr stark, also sind die Magnete sehr stark und daher wird die elektromotorische Kraft sehr groß und deshalb auch die Klemmenspannung verhältnismäßig groß. Mit wachsendem Widerstand wächst anfangs auch die Klemmenspannung. Aber dann wird durch den schwächer werdenden Strom auch der wirksame Magnetismus und damit die elektromotorische Kraft kleiner und daher nimmt auch die Klemmenspannung wieder ab, die bei ungeschlossener Maschine schließlich zu Null wird. Die Klemmenspannung nimmt bei wachsendem äußeren Widerstand erst ein wenig zu und dann stetig ab. Die Stromstärke nimmt mit wachsendem äußeren Widerstand rasch und stetig ab.

Das Verhalten der Klemmenspannung ist also in diesem Falle ziemlich das entgegengesetzte von dem bei einer Nebenschlußmaschine. Dort nimmt die Klemmenspannung von Null an bis zu einem größten Wert zu, hier nimmt sie von einem größten Wert bis zu Null ab. Man wird also schon von vornherein sagen können, daß, wenn man die Magnete

sowohl durch den Hauptstrom als durch einen Zweigstrom erregt, wie es in der Compoundschaltung geschieht, man erreichen können wird, daß die Klemmenspannung sich fast gar nicht ändert, wenn auch der äußere Widerstand stark variiert. Dies ist in der Tat der Fall und gerade aus diesem Grunde werden die Maschinen für bestimmte Zwecke mit Compoundschaltung konstruiert.

4. Bei den Compoundmaschinen kann man es durch richtige Bemessung der Hauptstromwickelung und der Nebenschlußwickelung für die Magnete oder, wie man es nennt, durch richtige Compoundierung dahin bringen, daß die Klemmenspannung fast ganz unabhängig von dem äußeren Widerstand wird, daß sie für alle äußeren Widerstände ziemlich dieselbe ist. Man kann es erreichen, daß bei Compoundmaschinen die höchste Änderung der Klemmenspannung 1—2 Proz. ihres Wertes beträgt. Die Stromstärke nimmt daher dann mit wachsendem Widerstand stetig ab, was bei konstanter Klemmenspannung selbstverständlich ist.

Von der Klemmenspannung und der Stromstärke hängt in jedem Falle der elektrische Effekt ab, der im äußeren Stromkreis herrscht. Gerade die Vorgänge im äußeren Stromkreis, z. B. das Brennen von Lampen oder das Treiben von elektrischen Motoren oder galvanoplastische Vorgänge, sind es ja, welche die nützliche Arbeit der Dynamomaschinen ausmachen.

Die Klemmenspannung einer Maschine in Volt ausgedrückt, multipliziert mit der Stromstärke im äußeren Stromkreis in Ampere gibt den äußeren Effekt in Watt, oder wenn man die Zahl der Watt durch 736 dividiert, in Pferdekräften. Außer diesem äußeren, nutzbaren Effekt, der natürlich von einer Kraftquelle (Dampfmaschine, Gasmaschine, Turbine) auf die Dynamomaschine übertragen werden muß (durch Riemen, Zahnräder oder dergl.), verbraucht aber jede Maschine noch einen bestimmten Effekt in ihrem Innern bloß dadurch, daß der Strom im Anker und um die Magnete herum fließt und diese erwärmt. Es ist die Aufgabe einer guten Maschinenkonstruktion, diesen Effekt im Innern möglichst klein zu machen, damit der Hauptteil der übertragenen Arbeit im äußeren Stromkreis wirklich nutzbar verwendet werden kann. Das Verhältnis des äußeren Effekts zum gesamten (im Innern der Maschine und im äußeren Stromkreis zusammen) entwickelten elektrischen Effekt nennt man den elektrischen Wirkungsgrad der Maschine und drückt ihn in Prozenten aus. Dieser beträgt bei den größten Maschinen bis zu 96 Proz., wenn die Maschinen, wie man sagt, voll belastet sind, d. h. wenn die Stromstärke im äußeren Kreis so groß ist, wie sie bei der betreffenden Maschine sein soll.

Selbstverständlich muß die in jeder Sekunde von der Betriebsmaschine (Dampfmaschine, Turbine etc.) geleistete Arbeit noch größer sein als der im Stromkreis enthaltene totale Effekt. Denn die Betriebsmaschine hat erstens noch die mechanische Reibung der Maschinenteile zu überwinden; zweitens aber wird noch ein nicht unerheblicher Bruchteil der Arbeit sofort in Wärme verwandelt, teilweise durch das fortwährende Ummagnetisieren des Ankers, also durch die Hysteresis, teil-

weise durch die Wirbelströme, welche vollständig selbst bei guter Zerteilung der Metallmassen nicht zu vermeiden sind.

Es werden bei den neueren größeren Gleichstrommaschinen durchschnittlich 80 bis 93 Proz. der aufgewendeten Arbeit als elektrische Energie im äußeren Stromkreis nutzbar zur Verfügung stehen, so daß also das absolute Güteverhältnis oder der Wirkungsgrad der Maschinen (s. S. 369) 80 bis 93 Proz. beträgt.

Durch die Anforderungen der Praxis hat sich allmählich der Bedarf an Nebenschlußmaschinen als weit größer erwiesen, wie der an Hauptstrommaschinen und Compoundmaschinen. Die ersteren nämlich sind für fast alle Zwecke, für die Beleuchtung, die Kraftverteilung und für die Elektrochemie vorzüglich geeignet, weil sie, neben sonstigen Vorteilen, namentlich eine leichte Regulierung der Klemmenspannung ermöglichen; sie sind also da immer besonders brauchbar, wo die Maschine nicht immer denselben, sondern, je nach Bedarf, verschiedenen Effekt abzugeben hat. Die Hauptstrommaschinen dagegen eignen sich gut für diejenigen Fälle, in denen immer dieselbe Leistung verlangt wird, z. B. für die Beleuchtung von Straßen mit Bogenlicht, wobei immer dieselbe Zahl Lampen brennt, also immer derselbe Effekt von der Maschine verlangt wird.

Bei den Nebenschlußdynamos kann man in sehr einfacher Weise die Klemmenspannung konstant halten oder ändern und damit die Stromstärke im äußeren Stromkreis regulieren, ohne in den äußeren Stromkreis nutzlose Widerstände einzuführen.

Man braucht nämlich nur in den Zweigstrom, welcher um die Magnete fließt, einen regulierbaren Widerstand einzuschalten, um dadurch die Klemmenspannung auf jeden beliebigen Wert bringen zu können. Einen solchen Widerstand nennt man Nebenschlußregulator. Schaltet man in die Magnetbewickelung Widerstände ein, so wird dieser Nebenstrom schwächer und infolgedessen auch die Klemmenspannung der Maschine. Schaltet man Widerstände aus dem Regulator, also aus dem Nebenstrom aus, so wird dieser letztere stärker und daher auch die Klemmenspannung der Maschine. So kann man durch einfaches Ein- und Ausschalten von Widerständen die Klemmenspannung der Maschine verändern, oder man kann sie auch, wenn man will, immer auf dieselbe Größe bringen, wie groß auch die Stromstärke im äußeren Stromkreis ist. Natürlich muß dann immer, wenn man nicht komplizierte automatische Vorrichtungen anbringen will, ein Mann zur Bedienung des Regulators vorhanden sein. Um die vorhandene Spannung erkennen zu können, ist mit den Klemmen der Maschine dauernd ein Spannungsmesser (Voltmeter) verbunden. Es wird nun aus dem Regulator so viel Widerstand ein- oder ausgeschaltet, bis das Voltmeter die gewünschte Spannung zeigt.

Der Nebenschlußregulator besteht also aus Widerständen, welche in den Nebenstromkreis ein- und aus ihm ausgeschaltet werden können.

Gewöhnlich wird der Regulator aus einem einfachen Kurbelrheostaten gebildet, von dem Fig. 354 eine Abbildung gibt. Wir haben den Apparat schon auf S. 89 beschrieben. Das eine Ende der

Magnetbewickelung ist, wie man aus der Schaltung einer Nebenschlußmaschine in Fig. 332 auf S. 359 sieht, mit der Klemme E, das andere mit der Klemme A und dadurch mit der drehbaren Kurbel verbunden. Bei jeder Stellung der Kurbel ist nun ein anderer Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet. Durch allmähliches Hineinschieben der Kurbel von A nach E sind immer weniger Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet. Häufig sind die Widerstände des Regulators in einen Kasten eingeschlossen, auf dessen Deckel nur die Kontaktstücke und die Kurbel sichtbar sind. So zeigt Fig. 355 einen Nebenschlußregulator der Siemens-Schuckertwerke. Man sieht nur die Kurbel und die Kontaktstücke, die Widerstände selbst sind in dem Kasten angebracht.

Um die Klemmenspannung an den Polen einer Dynamomaschine in jedem Moment sofort ablesen zu können und dadurch etwaige Regulierungen am Nebenschlußregulator vorzunehmen, wird mit jeder

Fig. 354.

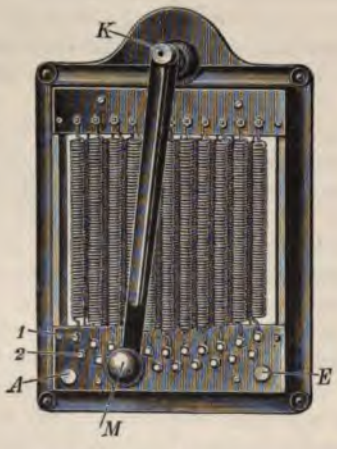


Fig. 355.

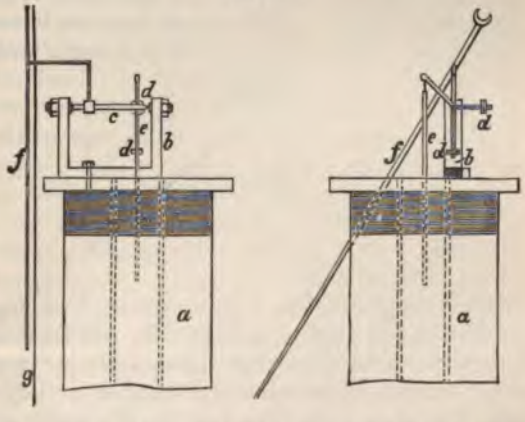
Dynamomaschine ein Voltmeter verbunden. Ebenso will man auch die Stromstärke im äußeren Stromkreis sofort, ohne Rechnung, ablesen können und bringt zu dem Zweck in den Hauptstromkreis ein Amperemeter hinein. Es kommt bei diesen technischen Instrumenten weniger auf die äußerste Genauigkeit als vielmehr darauf an, daß sie unmittelbar die vorhandene Spannung und die vorhandene Stromstärke abzulesen gestatten, und zwar direkt die Stromstärke in Ampere und die Spannung in Volt. Ferner müssen sie hinreichend genaue Angaben auch bei sehr großen Intensitäten und Spannungen machen und endlich sollen sie unabhängig davon sein, daß in den Maschinenräumen, wo sie ja gewöhnlich aufgestellt werden, sich große Eisenmassen bewegen, wie die Kolben der Dampfmaschine, oder daß starke Magnete in der Nähe sind, wie die Feldmagnete der Dynamomaschine selbst. Solche Apparate werden natürlich nicht im ganzen Intervall von der kleinsten bis zur größten Stromstärke und von der kleinsten bis zur größten Spannung gleich genaue Angaben machen können. Am genauesten sollen sie dann bei denjenigen Stromstärken und Spannungen sein, welche für die betreffende Anlage die wich-

tigsten sind. Man hat solche Meßinstrumente für technische Zwecke in verschiedenartiger Weise konstruiert. Die Apparate für Strommessung und diejenigen für Spannungsmessung sind im allgemeinen ganz gleich konstruiert. Nur werden die Amperemeter direkt in den Hauptstrom eingeschaltet und enthalten deshalb wenig Windungen von dickem Draht, während die Voltmeter, wie wir oben S. 100 erklärt haben, eine Zweigleitung bilden und viele Windungen eines dünnen Drahtes erhalten. Man benutzt die verschiedenen magnetischen Wirkungen des Stromes zur Konstruktion solcher Meßapparate.

Fig. 356.

So wird bei einfachen Amperemetern und Voltmetern der A.E.G., von denen Fig. 356 die äußere Ansicht eines Voltmeters zeigt, die anziehende Wirkung benutzt, welche eine von einem Strom durchflossene Drahtspule auf einen Eisenkern ausübt. Man sieht in Fig. 357 die innere Einrichtung dieser Apparate. Die Drahtrolle a besitzt oben ein Lager, auf welchem ein Winkelhebel sich drehen kann. Dieser trägt den Eisenkern e, welcher außerordentlich leicht ist, 0,04 g wiegt, und der durch den Strom in die Spule mehr oder minder hineingezogen wird. Je nach der Drehung der Achse c, auf der er sitzt, wird dann auch der Zeiger f gedreht, der auf der Skala spielt. Durch eine größere oder geringere Länge des Eisenkerns, sowie durch passende Einstellung von Reguliergewichten d kann man jede Skala herstellen. Das Instrument wird direkt auf Ampere oder auf Volt geeicht, je nachdem es im Hauptstrom oder im Nebenstrom liegt.

Fig. 357.



In ähnlicher Weise sind die Meßapparate von anderen Fabriken eingerichtet.

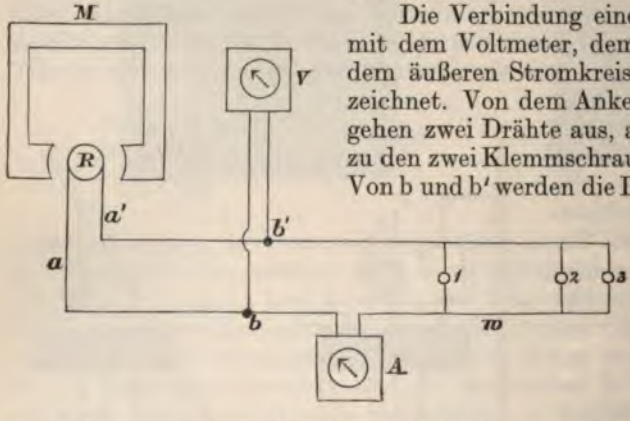
Jetzt werden, obwohl diese Instrumente teuerer sind, mehr und mehr auch für die technischen Anlagen Präzisionsmeßinstrumente angewendet, welche nach dem Deprezschen Prinzip (S. 192) auf der Ablenkung einer stromdurchflossenen Drahtrolle in einem starken magnetischen Feld beruhen. Sie sind dadurch gegen die Einwirkung von äußeren Eisenmassen im Maschinenraum und gegen

die Wirkung von nahe vorbeifließenden starken Strömen geschützt. So stellt Fig. 358 einen Präzisionsstromzeiger von Siemens & Halske dar, der im Innern ebenso konstruiert ist, wie die Amperemeter, die auf S. 187 beschrieben wurden. Die Präzisionsspannungsmesser sehen genau so aus und sind auch genau so konstruiert. Die Voltmeter werden, wie immer, im Nebenschluß an die Klemmen der Dynamomaschinen geschaltet. Die Amperemeter aber werden nicht, wie gewöhnlich, direkt in den Hauptstromkreis gelegt. Vielmehr wird jedem Amperemeter ein genau abgemessener kleiner Widerstand beigegeben, der bei den kleinen Instrumenten direkt im Gehäuse des Instrumentes liegt. Dieser kleine Widerstand ist es, der in den Hauptstromkreis eingeschaltet wird, und zu diesem liegt das Amperemeter im Nebenschluß. Die Skala ist in Ampere so geteilt, daß sie direkt die Stromstärke im Hauptstromkreis angibt.

Fig. 358.

Alle diese Apparate müssen natürlich zunächst geeicht werden, d. h. es muß die Skala in Ampere resp. Volt hergestellt werden, indem man Ströme von gemessener Stärke durch den Apparat direkt oder im Nebenschluß gehen läßt und den Ausschlag auf der Skala beobachtet.

Fig. 359.



Die Verbindung einer Dynamomaschine mit dem Voltmeter, dem Amperemeter und dem äußeren Stromkreis ist in Fig. 359 gezeichnet. Von dem Anker R der Maschine M gehen zwei Drähte aus, a b und a′ b′, welche zu den zwei Klemmschrauben b und b′ führen. Von b und b′ werden die Drähte w fortgeführt, welche die Hauptleitungen für die dazwischen zu schaltenden Apparate 1, 2, 3 u. s. w. bilden. In den einen dieser Drähte wird das Amperemeter A eingeschaltet. Das Voltmeter V dagegen wird in den Nebenschluß zu den beiden Drähten gelegt. Bei der wirklichen Benutzung der Dynamomaschinen sind allerdings diese Apparate noch nicht ausreichend. Vielmehr werden dann noch Ausschalter und Sicherungen mit einzuschalten sein, von denen wir aber erst im folgenden sprechen werden.

2. Kapitel.

Die Dynamomaschinen für Wechselstrom und Drehstrom.

Die Gleichstrommaschinen spielten lange Zeit die Hauptrolle in der Elektrotechnik. Man konnte anfangs mit Wechselströmen, die ja bei der abwechselnden Induktion zunächst auftreten, nicht viel anfangen, da die eigentümlichen Verhältnisse der Wechselströme, die sehr bedeutend von denen der Gleichströme abweichen, wissenschaftlich nicht näher untersucht waren. Lange Zeit wurden daher ausschließlich Gleichstrommaschinen in der Elektrotechnik benutzt. Dies hat sich aber jetzt vollständig geändert. Die Wechselströme, und zwar insbesondere die Kombination mehrerer Wechselströme, die man Drehströme nennt, sind zu hohen Ehren gekommen, weil sie es ermöglichen, eine Fortleitung und Verteilung der elektrischen Energie in so einfacher und billiger Weise herzustellen, wie es mit Gleichströmen nicht möglich ist. Dies beruht auf folgendem Umstand. Die Fortleitung von elektrischer Energie auf große Entfernung ist um so teurer, je größer die Stärke der Ströme ist, und um so billiger, je geringer die Stärke, je größer aber dafür die Spannung ist. Denn für starke Ströme braucht man Leitungen von großem Querschnitt, also viel Kupfer, und für schwache Ströme Leitungen von geringem Querschnitt, also wenig Kupfer. Kupfer ist aber teuer. Am vorteilhaftesten für die Fernleitung elektrischer Energie sind also Ströme mit möglichst hoher Spannung und geringer Stromstärke. Nun kann man zwar aus Maschinen aller Art prinzipiell Ströme von hoher Spannung erhalten, indem man nur die Zahl der Umwindungen auf dem Anker und die Geschwindigkeit der Umdrehungen groß zu machen braucht. Aber faktisch kann man bei Maschinen mit beweglichen Drahtwickelungen keine zu hohe Spannung erzeugen, weil ein Überschlagen der Elektrizität namentlich am Kommutator zu leicht eintritt. Hier haben nun die Wechselströme einen großen Vorteil vor den Gleichströmen. Einerseits nämlich haben die Wechselstrommaschinen überhaupt keinen Kommutator, und man kann sie auch sogar so konstruieren, daß sie absolut keine bewegliche Drahtwickelung besitzen. Andererseits aber kann man Wechselströme, wie wir sehen werden, mit Leichtigkeit und Sicherheit durch die Transformatoren von geringer Spannung auf hohe Spannung bringen oder von hoher Spannung auf geringe Spannung zurückbringen, und damit hat man nun ein vorzügliches Mittel einerseits zur Fortleitung der Elektrizität auf billigste Weise, andererseits zu ihrer gefahrlosen Benutzung an den Verbrauchsstellen. Man erzeugt Wechselströme von hoher Spannung durch eine Wechselstrommaschine, leitet sie in die Ferne und dort transformiert man sie auf beliebige niedrige Spannung zurück. Mit gleichgerichteten Strömen kann man denselben Prozeß nicht so ausführen,

weil man erstens Gleichstrommaschinen für hohe Spannungen nicht bauen kann und weil es zweitens keine Gleichstromtransformatoren für hohe Spannungen gibt. Dazu kommt noch, daß auch die Motoren, durch welche man mittels Drehstroms Arbeit leisten kann, jetzt sogar vollkommener sind als die Motoren für Gleichstrom. Aus diesen Gründen werden jetzt Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen in großen Mengen gebaut und zum Teil solche von kolossalen Dimensionen. Ja es werden heutzutage die elektrischen Zentralen in größeren Städten meistenteils überhaupt nur noch mit Drehstrom ausgeführt, eben wegen der sonst unerreichbaren Billigkeit dieses Systems.

Diejenige Firma, welche lange allen anderen voraus das Wechselstromsystem für elektrotechnische Zwecke zuerst in vorzüglicher Weise ausgebaut hat, ist die Firma Ganz & Co. in Budapest. Die praktische Nutzbarmachung der Drehströme verdankt man der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, speziell ihrem Elektriker Dolivo-Dobrowolsky, und der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz. Seit 1891 hat sich die Technik des Wechselstromes und Drehstromes, oder besser gesagt, die Technik der Ein- und Mehrphasenströme außerordentlich entwickelt und nimmt heute den breitesten Raum in der Elektrotechnik ein.

Wechselstrommaschinen sind prinzipiell viel einfacher als Gleichstrommaschinen zu bauen. Um Gleichströme zu erhalten, mußte erst Gramme seinen Ring oder Hefner-Alteneck seine Trommelwickelung ersinnen. Wenn man dagegen, ohne besondere Kunstgriffe, eine Anzahl von Drahtrollen (mit oder ohne Eisenkern) vor einer Anzahl von abwechselnden Magnetpolen rotieren läßt, dann werden von selbst in den Rollen abwechselnd entgegengesetzte Stromimpulse erzeugt. Und man braucht nun die Rollen nur passend zu verbinden, um einen oder mehrere Stromkreise mit Wechselströmen zu erhalten. Dabei sieht man auch sofort, daß, wenn man nicht einen, sondern mehrere Stromkreise durch Zusammenschaltung mehrerer Rollen bildet, man es leicht so einrichten kann, daß die Wechselströme in diesen verschiedene Phasen haben, so daß man auch leicht Mehrphasenströme aus einer solchen Maschine erhalten kann.

Man ist bei den Wechselstrommaschinen nicht gezwungen, eine Anzahl von Drahtspulen, seien sie auf einen Ring oder auf eine Trommel aufgewickelt, gerade in ganz bestimmter Weise zu verbinden, sondern man kann verschiedenfache Kombinationen anwenden. Man kann die Spulen alle hintereinander oder alle parallel verbinden, oder man kann mehrere getrennte Stromkreise mit gleicher oder verschiedener Phase bilden und diese auch wieder kombinieren.

Die Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen bestehen alle aus den induzierten Drahtspulen, die man zusammen als Induktor oder Anker oder Armatur bezeichnet, und den induzierenden Magneten. Als Magnete werden nur Elektromagnete benutzt. Und zwar werden bei den meisten Maschinen diese Elektromagnete durch einen besonderen Strom gespeist, der von einer Gleichstrommaschine erzeugt wird, die ganz getrennt von der Wechselstrommaschine ist. Manchmal aber sitzen diese Gleichstrommaschinen auf derselben Drehungsachse

wie die Hauptmaschine für Wechselstrom. Man kann es aber auch so einrichten, daß man den Gleichstrom für die Elektromagnete nicht von einer besonderen Maschine entnimmt, sondern einen Teil des erzeugten Wechselstromes, den man von einigen besonderen Spulen des Ankers entnimmt, selbst durch einen Kommutator zu Gleichstrom macht und ihn so um die Magnete führt. Maschinen, die diese Einrichtung haben, nennt man selbsterregende Wechselstrommaschinen. Die Drahtspulen des Induktors werden auf Eisenkerne gewickelt, wodurch viel kräftigere Induktionsströme erzeugt werden, als wenn man auf die Drahtrollen allein die Induktion wirken läßt. Die Eisenkerne werden aber dabei sehr rasch hintereinander positiv und negativ magnetisch, und diese fortwährende Änderung des Magnetismus ist, wie wir wissen, mit erheblicher Erhitzung der Eisenkerne durch Hysteresis verbunden. Die dadurch verursachten Energieverluste werden um so größer, je mehr Polwechsel die Kerne pro Sekunde erfahren. Man kann daher praktisch bei Wechselströmen nicht jede beliebige Zahl von Polwechseln erreichen, sondern muß sich auf eine verhältnismäßig geringe Zahl (50 bis 100 pro Sekunde) beschränken. Außer den Energieverlusten durch Hysteresis hat man natürlich auch hier in den Kernen des Ankers die Foucaultschen Ströme (Wirbelströme), die man aber durch sorgfältige Zerteilung des Eisens beseitigen kann.

Man kann nun bei den Wechselstrommaschinen entweder die Magnete feststehen lassen und den Anker drehen, oder umgekehrt den Anker feststellen und die Magnete bewegen. Dreht sich der Anker, von dem man den Strom in die äußere Leitung senden will, so muß man seine Drahtenden an Ringe auf der Achse, Schleifringe führen, von denen man durch schleifende Bürsten den Strom abnehmen läßt. Bleibt dagegen der Anker fest, so werden seine Enden direkt mit dem äußeren Stromkreis verbunden. Dies ist namentlich bei sehr hohen Stromspannungen vorteilhaft. Die allermeisten Maschinen für Wechselstrom und Drehstrom werden so gebaut, daß die Magnete rotieren und der Anker fest bleibt, so daß man von festen Klemmen den Strom vom Anker nach außen führen kann.

In jedem Fall aber unterscheiden sich die Wechselstrommaschinen von den Gleichstrommaschinen dadurch, daß sie absolut keinen Kommutator (Kollektor) brauchen, und das ist ein wesentlicher ökonomischer und konstruktiver Vorzug der Wechselstrommaschinen. Denn erstens ist der Kommutator ein der Abnutzung am meisten unterliegender Teil der Maschinen, zweitens aber ist gerade die Notwendigkeit des Kommutators bei Gleichstrommaschinen ein Hindernis dafür, sie für hohe Spannungen zu bauen. Am Kommutator würden sich die hohen Spannungen zunächst ausgleichen. Daher kann man Wechselstrommaschinen leicht für hohe Spannungen bauen, bis zu zehntausend und mehr Volt, während das bei Gleichstrommaschinen bisher nicht in praktischer Weise möglich ist.

Bei jeder Wechselstrommaschine hat man eine mehr oder minder große Anzahl von Spulen auf dem Induktor, denen abwechselnd je ein Nordpol und ein Südpol gerade gegenüberstehen. Für die Verbindung zusammengehöriger Drähte kann man nun verschiedene Methoden be-

weil man erstens Gleichstrommaschinen für hohe Spannungen nicht bauen kann und weil es zweitens keine Gleichstromtransformatoren für hohe Spannungen gibt. Dazu kommt noch, daß auch die Motoren, durch welche man mittels Drehstroms Arbeit leisten kann, jetzt sogar vollkommener sind als die Motoren für Gleichstrom. Aus diesen Gründen werden jetzt Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen in großen Mengen gebaut und zum Teil solche von kolossalen Dimensionen. Ja es werden heutzutage die elektrischen Zentralen in größeren Städten meistenteils überhaupt nur noch mit Drehstrom ausgeführt, eben wegen der sonst unerreichbaren Billigkeit dieses Systems.

Diejenige Firma, welche lange allen anderen voraus das Wechselstromsystem für elektrotechnische Zwecke zuerst in vorzüglicher Weise ausgebaut hat, ist die Firma Ganz & Co. in Budapest. Die praktische Nutzbarmachung der Drehströme verdankt man der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin, speziell ihrem Elektriker Dolivo-Dobrowolsky, und der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz. Seit 1891 hat sich die Technik des Wechselstromes und Drehstromes, oder besser gesagt, die Technik der Ein- und Mehrphasenströme außerordentlich entwickelt und nimmt heute den breitesten Raum in der Elektrotechnik ein.

Wechselstrommaschinen sind prinzipiell viel einfacher als Gleichstrommaschinen zu bauen. Um Gleichströme zu erhalten, mußte erst Gramme seinen Ring oder Hefner-Alteneck seine Trommelwickelung ersinnen. Wenn man dagegen, ohne besondere Kunstgriffe, eine Anzahl von Drahtrollen (mit oder ohne Eisenkern) vor einer Anzahl von abwechselnden Magnetpolen rotieren läßt, dann werden von selbst in den Rollen abwechselnd entgegengesetzte Stromimpulse erzeugt. Und man braucht nun die Rollen nur passend zu verbinden, um einen oder mehrere Stromkreise mit Wechselströmen zu erhalten. Dabei sieht man auch sofort, daß, wenn man nicht einen, sondern mehrere Stromkreise durch Zusammenschaltung mehrerer Rollen bildet, man es leicht so einrichten kann, daß die Wechselströme in diesen verschiedene Phasen haben, so daß man auch leicht Mehrphasenströme aus einer solchen Maschine erhalten kann.

Man ist bei den Wechselstrommaschinen nicht gezwungen, eine Anzahl von Drahtspulen, seien sie auf einen Ring oder auf eine Trommel aufgewickelt, gerade in ganz bestimmter Weise zu verbinden, sondern man kann verschiedenfache Kombinationen anwenden. Man kann die Spulen alle hintereinander oder alle parallel verbinden, oder man kann mehrere getrennte Stromkreise mit gleicher oder verschiedener Phase bilden und diese auch wieder kombinieren.

Die Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen bestehen alle aus den induzierten Drahtspulen, die man zusammen als Induktor oder Anker oder Armatur bezeichnet, und den induzierenden Magneten. Als Magnete werden nur Elektromagnete benutzt. Und zwar werden bei den meisten Maschinen diese Elektromagnete durch einen besonderen Strom gespeist, der von einer Gleichstrommaschine erzeugt wird, die ganz getrennt von der Wechselstrommaschine ist. Manchmal aber sitzen diese Gleichstrommaschinen auf derselben Drehungsachse

wie die Hauptmaschine für Wechselstrom. Man kann es aber auch so einrichten, daß man den Gleichstrom für die Elektromagnete nicht von einer besonderen Maschine entnimmt, sondern einen Teil des erzeugten Wechselstromes, den man von einigen besonderen Spulen des Ankers entnimmt, selbst durch einen Kommutator zu Gleichstrom macht und ihn so um die Magnete führt. Maschinen, die diese Einrichtung haben, nennt man selbsterregende Wechselstrommaschinen. Die Drahtspulen des Induktors werden auf Eisenkerne gewickelt, wodurch viel kräftigere Induktionsströme erzeugt werden, als wenn man auf die Drahtrollen allein die Induktion wirken läßt. Die Eisenkerne werden aber dabei sehr rasch hintereinander positiv und negativ magnetisch, und diese fortwährende Änderung des Magnetismus ist, wie wir wissen, mit erheblicher Erhitzung der Eisenkerne durch Hysteresis verbunden. Die dadurch verursachten Energieverluste werden um so größer, je mehr Polwechsel die Kerne pro Sekunde erfahren. Man kann daher praktisch bei Wechselströmen nicht jede beliebige Zahl von Polwechseln erreichen, sondern muß sich auf eine verhältnismäßig geringe Zahl (50 bis 100 pro Sekunde) beschränken. Außer den Energieverlusten durch Hysteresis hat man natürlich auch hier in den Kernen des Ankers die Foucaultschen Ströme (Wirbelströme), die man aber durch sorgfältige Zerteilung des Eisens beseitigen kann.

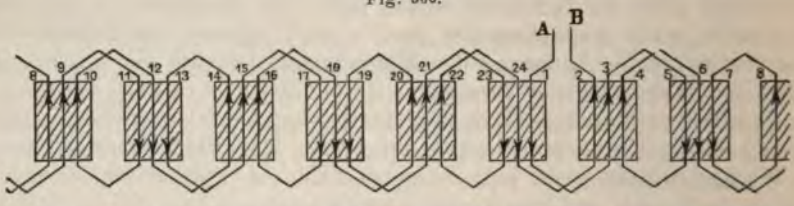
Man kann nun bei den Wechselstrommaschinen entweder die Magnete feststehen lassen und den Anker drehen, oder umgekehrt den Anker feststellen und die Magnete bewegen. Dreht sich der Anker, von dem man den Strom in die äußere Leitung senden will, so muß man seine Drahtenden an Ringe auf der Achse, Schleifringe führen, von denen man durch schleifende Bürsten den Strom abnehmen läßt. Bleibt dagegen der Anker fest, so werden seine Enden direkt mit dem äußeren Stromkreis verbunden. Dies ist namentlich bei sehr hohen Stromspannungen vorteilhaft. Die allermeisten Maschinen für Wechselstrom und Drehstrom werden so gebaut, daß die Magnete rotieren und der Anker fest bleibt, so daß man von festen Klemmen den Strom vom Anker nach außen führen kann.

In jedem Fall aber unterscheiden sich die Wechselstrommaschinen von den Gleichstrommaschinen dadurch, daß sie absolut keinen Kommutator (Kollektor) brauchen, und das ist ein wesentlicher ökonomischer und konstruktiver Vorzug der Wechselstrommaschinen. Denn erstens ist der Kommutator ein der Abnutzung am meisten unterliegender Teil der Maschinen, zweitens aber ist gerade die Notwendigkeit des Kommutators bei Gleichstrommaschinen ein Hindernis dafür, sie für hohe Spannungen zu bauen. Am Kommutator würden sich die hohen Spannungen zunächst ausgleichen. Daher kann man Wechselstrommaschinen leicht für hohe Spannungen bauen, bis zu zehntausend und mehr Volt, während das bei Gleichstrommaschinen bisher nicht in praktischer Weise möglich ist.

Bei jeder Wechselstrommaschine hat man eine mehr oder minder große Anzahl von Spulen auf dem Induktor, denen abwechselnd je ein Nordpol und ein Südpol gerade gegenüberstehen. Für die Verbindung zusammengehöriger Drähte kann man nun verschiedene Methoden be-

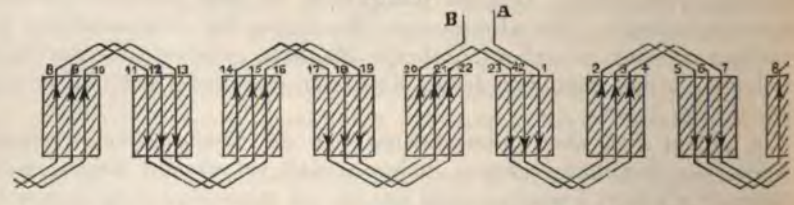
nutzen. Da in allen Drähten, welche gleichzeitig an demselben Pol, z. B. dem Nordpol, vorübergehen, Ströme nach der einen Richtung induziert werden, in den gleichzeitig an dem Südpol vorbeigehenden Drähten dagegen solche nach der anderen Richtung, so muß immer das Ende eines Drahtes der ersten Gruppe mit dem Anfang eines Drahtes der folgenden Gruppe verbunden werden, Anfang und Ende hier in der Richtung der induzierten Ströme genommen. Zwei verschiedene Arten dieser Verbindung sind in Fig. 360 und 361 gezeichnet. In beiden sind 8 auf-

Fig. 360.



einanderfolgende, abwechselnde Magnetpole, Nord- und Südpole, schraffiert gezeichnet. Vor jedem Pol sind drei Drähte gezeichnet, im ganzen also 24. In diesen laufen die Ströme bei dem 1., 3., 5. Pol alle von unten nach oben, bei dem 2., 4., 6. Pol von oben nach unten. Man sieht, daß in Fig. 360, bei der wir von dem mit A bezeichneten Ende, der einen Endklemme des Drahtes, ausgehen, sich an den Draht 1 der Reihe nach alle anderen in passender Richtung anschließen, so daß immer Schleifen nach rechts und links gebildet werden, bis wir zur zweiten Endklemme B kommen. Eine solche Wickelung nennt man Schleifenwickelung. In Fig. 361 gehen wir auch von Klemme A aus zu Draht 1 und durchlaufen nun in

Fig. 361.



anderer, aber auch richtiger Weise alle Drähte, bis wir zu Draht 20 kommen, der an die andere Endklemme B führt. Eine solche Wickelung nennt man eine Wellenwickelung. Beide Arten der Wickelung und noch andere werden angewendet.

Für die Konstruktion der Wechselstrommaschinen gelten ganz dieselben Grundsätze und Regeln wie für Gleichstrommaschinen (S. 369 ff.), nämlich starkes Magnetfeld, möglichste Ausnutzung aller Kraftlinien zur Induktion, geringer Zwischenraum zwischen Magneten und Induktorspulen.

In neuerer Zeit werden Wechselstrom- und Drehstromdynamos zur Erzeugung von Strömen, die man auch Generatoren nennt, hauptsächlich in sehr großen, zum Teil riesigen Dimensionen gebaut. Für kleine Betriebe nämlich bietet der Gleichstrom manche Vorzüge vor

dem Wechselstrom, während gerade bei großen Zentralanlagen, die die Ströme oft auf weite Entfernung fortzuleiten haben, die hochgespannten Wechselströme, wie oben ausgeführt, besonders vorteilhaft sind.

Die modernen Wechselstrommaschinen haben alle einen ringförmigen Eisenmantel, auf welchem die Spulen des Ankers sitzen, und im Innern des Ringes das drehbare Magnetsystem, das aus vielen Magnetpolen besteht.

In dieser Weise werden von den Siemens-Schuckertwerken die Maschinen gebaut, und zwar werden Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen in ganz gleicher Form, nur mit verschiedenartiger Verbindung der Drähte auf dem Anker konstruiert. Bei beiden Dynamomaschinenarten ist der Anker ein feststehender äußerer Eisenring, und die Feldmagnete, die sternförmig im Innern des Rings angeordnet sind, rotieren. Die Feldmagnete werden durch einen besonderen Strom erregt, der von einer besonderen Gleichstrommaschine geliefert wird, die gewöhnlich auf derselben Achse sitzt wie der Magnetstern. Die Pole der Feldmagnete sind abwechselnd nord- und südmagnetisch und tragen abgerundete Polschuhe, wo sie dem Ring gegenüberstehen. Der eiserne Ring selbst ist an seinem inneren Umfang mit einer Anzahl von Nuten versehen, und zwar sind dreimal so viel Nuten vorhanden als Magnetpole. Fig. 362 zeigt den Magnetkranz M und den Eisenring R mit seinen Nuten. Sowohl der Ankerring wie die Feldmagnete sind aus Blechen zusammengesetzt, um die Wirbelströme zu verhindern. Die Drahtwickelung des Ankers wird nun in die Nuten eingelegt, und zwar erhält man gewöhnlichen Wechselstrom (Einphasenstrom) oder dreiphasigen Wechselstrom (Drehstrom), je nach der Art, wie man die Nuten zur Wickelung benutzt.

Fig. 362.

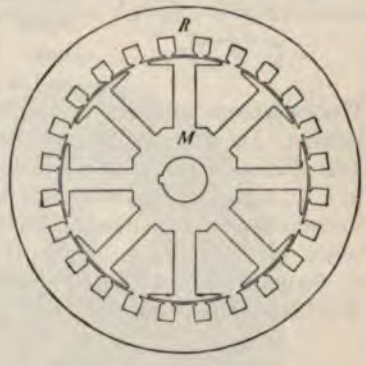


Fig. 363.

Um gewöhnlichen Wechselstrom zu erhalten, legt man, wie Fig. 363 zeigt, eine Wickelung in die Nuten 1 und 3, die folgende in 4 und 6 u. s. w., läßt also die Nuten 2, 5, 8 u. s. w. frei. Da die Wickelungen, deren drei mit a, b, c bezeichnet sind, in jedem Moment dieselbe Lage gegen die verschiedenen Magnetpole haben, so werden in ihnen Ströme von gleicher Phase induziert, wenn die Magnete sich drehen, aber natürlich in a und c Ströme, die, absolut genommen, die entgegengesetzte Richtung haben wie die in b u. s. w. Wenn man daher die Spulen alle hintereinander schalten will, so hat man die Spule b entgegengesetzt zu verbinden, also das Ende von a mit dem Ende von b und den Anfang von b mit dem Anfang von c. Die freien Enden der ersten und letzten Spule werden dann zu feststehenden Klemmen geführt, von denen man den Wechselstrom in den äußeren Stromkreis führen kann.

Um dagegen Drehstrom (dreiphasigen Wechselstrom) zu er-

halten, macht man die Wickelung so, wie sie in Fig. 364 angedeutet ist. Die erste Wickelung a wird in Nute 1 und 4 gelegt, die zweite b in 3 und 6, die dritte c in 5 und 8 u. s. w.; es wird also keine Nute freigelassen. Man sieht aus der Figur, daß in demselben Moment die Spule a gerade über der Mitte zweier Magnetpole sich befindet, während die Spule b über den Anfängen, die Spule c über den Enden steht. Bei der Rotation der Magnete entsteht nun in einer und derselben Spule, z. B. in a, wieder genau derselbe Stromimpuls wie bei der in der Figur gezeichneten Lage, wenn der erste Nordpol links (A) sich nach rechts bewegt hat, bis in die Lage des nächsten Nordpols rechts (C). Das heißt, eine volle Periode hat der Wechselstrom in jeder Spule, wenn das Magnetsystem sich von A bis C bewegt. Da nun der Winkel zwischen zwei verbundenen Nuten der dritte Teil dieses Winkels ist, so folgt, daß die Phasen der Wechselströme, die in a, b, c gleichzeitig induziert werden, um $^1/_3 \times 360 = 120^0$ gegeneinander verschoben sind. Dieselbe Phase wie a hat nun die Spule d u. s. w. Kurz, wenn man die 1., 4., 7. Spule miteinander verbindet, ebenso die 2., 5., 8., ferner die 3., 6., 9., so erhält man drei getrennte Stromleiter, in denen Wechselströme von je 120^0 Phasendifferenz auftreten. Diese drei Dreh-

Fig. 364.

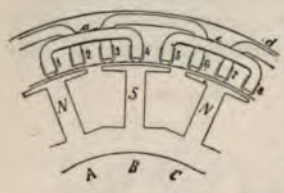
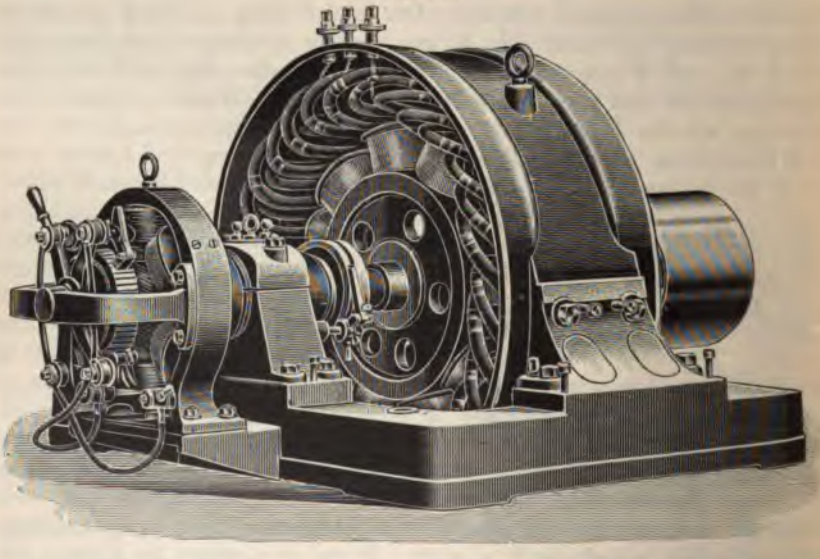


Fig. 365.



ströme kann man nun verketten (S. 261), sei es in Dreieckschaltung, sei es in Sternschaltung. Bei den Siemensschen Maschinen werden sie in Sternschaltung verbunden, d. h. die drei Enden der drei Spulensysteme werden miteinander verbunden, und die drei Anfänge werden zu je einer festen Klemme geführt. Von diesen drei Klemmen werden dann die Drehströme nach außen geführt.

In Fig. 365 ist eine größere W I- (Wechselstrom-Innenpol-) Maschine der Siemens-Schuckertwerke dargestellt und zwar eine Drehstrommaschine, welche mit der Antriebsmaschine (Dampfmaschine, Turbine) durch Riemen verbunden wird. Man sieht in der Figur das Magnetrad mit den dicken kurzen Magnetpolen. An dem äußeren Ring ist die Wickelung in der angeführten Weise angebracht. Vorn auf der Achse der Drehstrommaschine sieht man die Gleichstrommaschine (Erregermaschine), welche also direkt mit der Drehstrommaschine zusammengebaut ist.

Die zur Erregung der Magnete notwendige Energie beträgt bei den kleineren und mittleren Maschinen 2 bis 3 Proz., bei den großen 1 bis 2 Proz. der gesamten, auf die Maschine zu übertragenden Arbeit. Die Maschinen werden als rasch laufende (bis herauf zu 1000 Touren in der Minute) und langsam laufende (bis herunter zu 83 Touren) gebaut. Die rasch laufenden sind für kleinere Leistungen, bei denen sie etwa 20 bis 200 Pferdekräfte aufnehmen, die ganz langsamen für große Leistungen, für die 400 bis 5000 Pferdekräfte benutzt werden, bestimmt. Die Maschinen werden für Spannungen von 500 bis 5000 Volt, einzelne Modelle sogar bis zu 10000 Volt gewickelt. Für Turbinenantrieb wird die Achse der Maschine senkrecht angeordnet. Bei gleicher Größe ist eine Drehstrommaschine um fast ein Drittel leistungsfähiger als eine Wechselstrommaschine — wegen der besseren Ausnutzung des Wickelungsraumes am Ring.

Fig. 366.

Auch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin baut einen Teil ihrer Drehstrommaschinen in derselben Weise (Type G S M). Fig. 366 gibt eine Ansicht derselben. Man sieht an dem radförmigen Teil im Innern eine große Anzahl von Magnetkernen. Diese wirken induzierend auf die Drähte, welche in dem Eisengehäuse, das den Umfang bildet, passend angeordnet sind. Die Spulen des Ankers sind in die Nuten eines Eisenkerns gelegt. Häufig besteht jede Spule nur aus einem einzigen Kupferstab. Bei den großen Maschinen (über 200 Kilowatt) können Spannungen bis 10000 Volt, bei den kleinen Maschinen solche bis 3000 Volt erreicht werden.

Die Wechsel- und Drehstrommaschinen werden auch von der A.E.G. für eine Frequenz von 50 Perioden, also 100 Polwechseln, eingerichtet.

Übrigens kann man die Wechselstrommaschinen auch ganz so bauen wie die Gleichstrommaschinen, nämlich mit dem gewöhnlichen Ringanker oder Trommelanker. Wenn nämlich eine Spule vor abwechselnden Magnetpolen rotiert, so werden in ihr zunächst immer Wechselströme erzeugt, die man direkt abnehmen kann, wenn man die Enden der Spule an Schleifringe auf der Achse führt und auf diesen Bürsten schleifen läßt. So kann man daher auch aus einer Gleichstrommaschine, einer Ring- oder einer Trommelmaschine Wechselströme entnehmen. Denn bei ihr bewegt sich jede Spule einmal vor einem Nordpol, darauf bei einem Südpol vorbei, und es entstehen also in ihr Wechselströme. Wenn man also den Strom immer von dieser Spule (oder besser von zwei diametral gegenüberliegenden) durch Schleifringe (nicht durch einen Kommutator) abnimmt, so fließt in der Leitung Wechselstrom. Dieses Prinzip rührt von Ferraris her und wird zur Konstruktion von kleinen Wechselstrommaschinen benutzt. Dabei werden die Maschinen als Außenpolmaschinen gebaut. Bei diesen sind die Feldmagnete fest und der Anker rotiert. Die Tourenzahl der Maschinen und die Zahl der verwendeten Magnetpole steht so im Zusammenhang, daß die Wechselströme 50 Perioden in der Sekunde haben (daß also in jeder Spule 100 Polwechsel in der Sekunde eintreten). Es werden also von der Wickelung des Ankers alle diejenigen Windungen hintereinander geschaltet, welche in dem einen Sinne, und ebenso alle diejenigen, welche in dem anderen Sinne induziert werden. Die Anfänge dieser beiden entgegengesetzt induzierten Spulenreihen werden verbunden, die Enden werden zu zwei Schleifringen auf der Achse geführt, von denen dann der Wechselstrom abgenommen wird. Will man also aus dem Grammeschen Ring Gleichstrom erhalten, so nehmen die Bürsten bei der Drehung des Ringes fortwährend aus anderen Spulen den Strom ab; will man Wechselstrom erhalten, so nehmen die Bürsten immer aus denselben Spulen den Strom ab. Die einzelnen Spulensysteme werden hintereinander (in Serie) oder parallel geschaltet.

Man kann nun auch hier leicht jede Wechselstrommaschine so einrichten, daß sie zu einer Drehstrommaschine wird. Man braucht nämlich nur die einzelnen Ankerspulen so zusammenzufassen, daß mehrere getrennte Stromkreise vorhanden sind, in denen die Wechselströme verschiedene Phasen haben, dann hat man bereits eine Drehstrommaschine.

Wenn man also die freien Enden von zwei diametral gegenüberliegenden Spulen des Ringes, die man verbunden hat, zu 2 Schleifringen auf der Achse führt, so kann man von diesen einen Wechselstrom abnehmen. Macht man dasselbe mit zwei anderen diametral gegenüberliegenden Spulen, so erhält man ebenfalls einen Wechselstrom, der aber eine andere Phase als der erste hat. Sind diese Spulen z. B. um 90^0 von den ersten abstehend, so hat der Wechselstrom in ihnen eine um 90^0 verschiedene Phase. Denn wenn das erste Spulenpaar im Maximum der Induktion sich befindet, ist das zweite gerade an den Indifferenzstellen u. s. w. Man hat dann 4 Schleifringe auf der Achse, für jedes Spulenpaar 2, und man hat so eine Zweiphasenstrommaschine. Ebenso

kann man, wenn man ein Spulenpaar, das um 120° von dem ersten entfernt ist, und ein anderes Spulenpaar, das um 240° von dem ersten entfernt ist, je zu festen Schleifringen führt, 3 Wechselströme erhalten, von denen jeder gegen den folgenden eine Phasenverschiebung von 120° hat. Zunächst kann man die 6 freien Enden der 3 Spulenpaare zu je einem Schleifring führen, so daß man also 6 Schleifringe auf der Achse hat. Gewöhnlich aber werden die 3 Stromdrähte auf dem Anker selbst schon miteinander verkettet, und zwar entweder in Sternschaltung oder in Dreieckschaltung (oben S. 262), so daß an die Achse bloß die 3 freien Enden der 3 Drähte zu 3 Schleifringen geführt werden. Von diesen nimmt man durch Bürsten 3 Wechselströme ab, deren Phasen um je 120° voneinander abstehen.

Fig. 367.

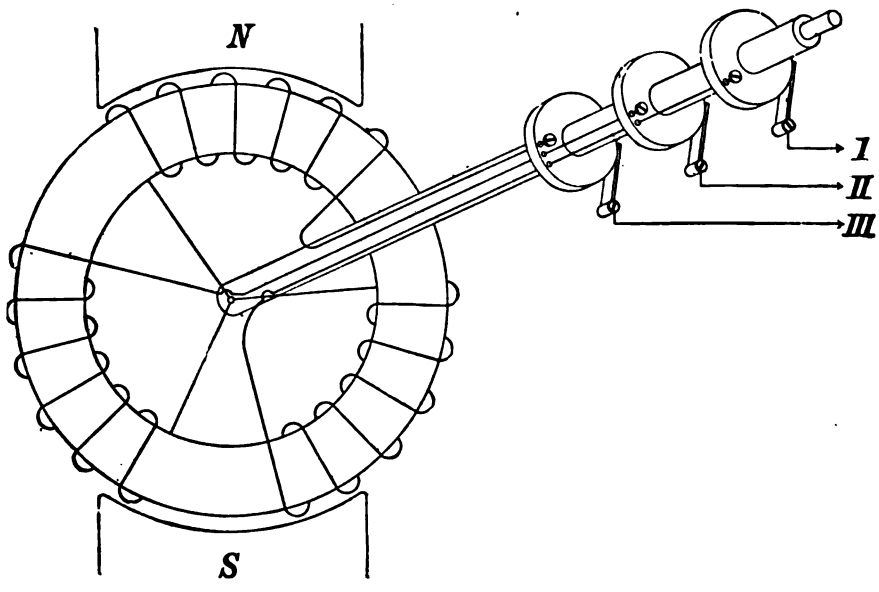


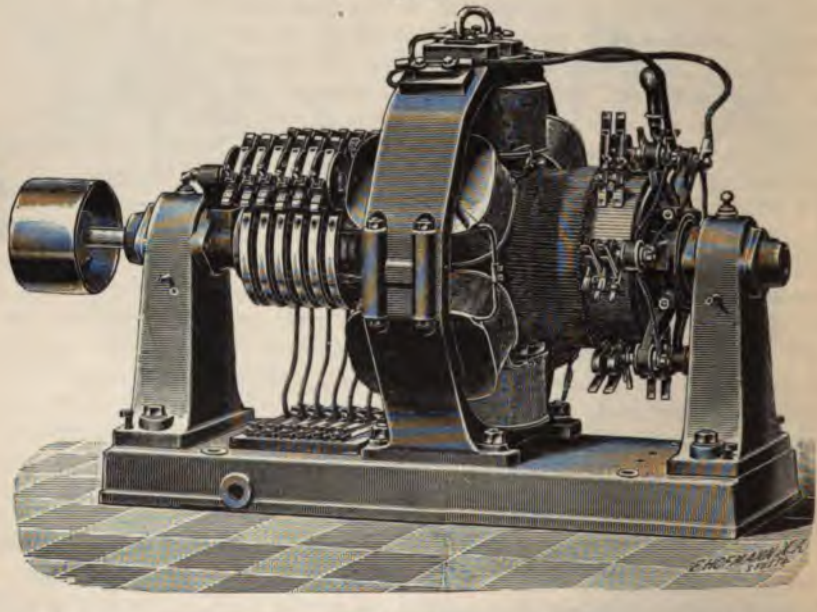
Fig. 367 zeigt schematisch, wie man aus dem Grammeschen Ring verkettete Drehströme erhält. Die drei Spulensysteme erzeugen bei der Rotation 3 verschiedenartige Wechselströme. Die Anfänge der Spulen sind am Ring miteinander verbunden, die Enden führen zu 3 Schleifringen auf der Achse, von denen die Bürsten I, II, III die Ströme abnehmen. Es ist also hier Sternschaltung vorhanden.

Man kann natürlich auch alle 6 Enden der 3 Drähte zu 6 Schleifringen führen; dann hat man 3 getrennte Stromkreise mit je 60° Phasendifferenz. Da die Maschinen für Gleichstrom und für Wechselstrom ganz gleich gebaut sind, nur daß die einen den Kommutator, die anderen bloße Schleifringe besitzen, so kann man auch eine und dieselbe Maschine für Gleichstrom und für Wechselstrom einrichten. Eine solche Maschine, wie sie früher von der Schuckert-E.-G. gebaut wurde und welche für Laboratoriumszwecke sehr brauchbar ist, ist in Fig. 368 gezeichnet. Man sieht eine 6polige Außenpolmaschine mit Trommelanker. Rechts ist der

Kommutator mit Bürsten für Gleichstrom, links sind 6 Schleifringe mit 6 Bürsten für 3 verschiedenphasige Wechselströme.

Bei den bisher beschriebenen Maschinen wurden entweder die Feldmagnete oder der Anker gedreht, und in jedem Fall mußten dabei Bürsten angewendet werden, sei es, um den gedrehten Feldmagneten Strom zuzuführen, oder um den Strom vom gedrehten Anker abzunehmen. Man kann aber die Maschinen für Wechselstrom- und Drehstrom auch so konstruieren, daß den bewegten Teilen überhaupt kein Strom zugeführt werden muß, resp. von ihnen abgeführt werden muß, daß also überhaupt keine Bürsten verwendet werden, sondern alle Stromzufuhr oder -entnahme nur von festen Klemmen aus geschieht.

Fig. 368.



Derartige Maschinen sind namentlich in Amerika durch Mordey ausgeführt worden. Man bezeichnet sie deshalb auch als Mordeymaschinen. Ihr Prinzip besteht darin, daß die beweglichen Magnetpole alle gemeinschaftlich von einer einzigen Spule erregt werden, nicht, wie bei den bisher beschriebenen, jede von einer besonderen. Diese Spule kann nun fest bleiben, während der Eisenkern sich dreht.

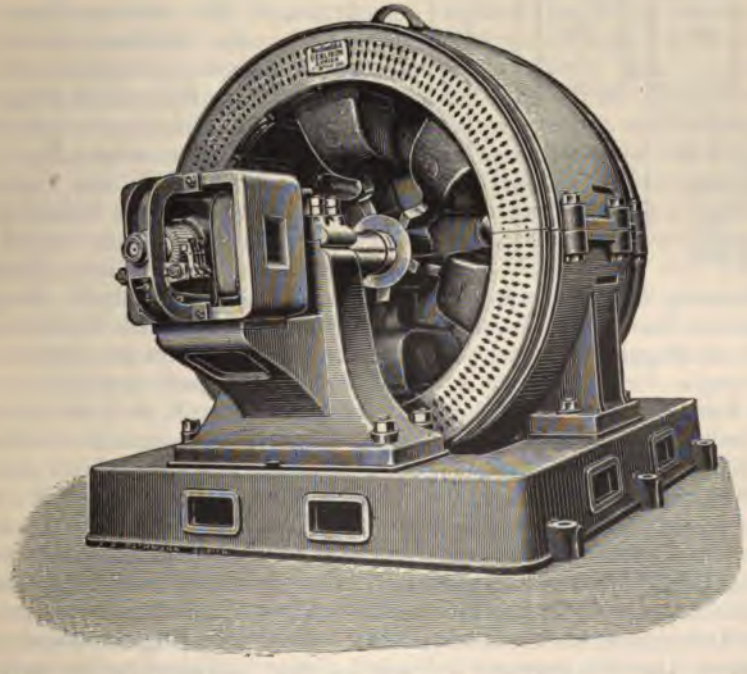
Dieses Prinzip ist bei einer Klasse von Wechsel- und Drehstromdynamos der Maschinenfabrik Oerlikon in folgender Weise benutzt worden. Man sieht in Fig. 369 den rotierenden Teil der Maschine. Derselbe ist aus Stahl (bei größeren Maschinen hat er die Form eines Rades). Um den mittleren Teil dieses Körpers wird die Magnetisierungsspirale gelegt. Diese magnetisiert den Körper so, daß die rechtsliegenden Pole (Polhörner) alle etwa nordmagnetisch, die linksliegenden alle südmagnetisch werden. Die Polhörner rotieren nun bei den Ankerspulen

vorbei, die selbst auf Eisenkerne gewickelt sind. Infolge der Annäherung und Entfernung der Pole entstehen in diesen Spulen Wechselströme, und diese werden durch passende Verbindung der Spulen als Ein- oder Mehrphasenströme nach außen zu feststehenden Klemmen geführt.

Fig. 369.

Die kreisförmige Magnetisierungsspule ist fest, und der Eisenkern mit den Polhörnern rotiert in ihr. Man sieht in Fig. 370 eine solche Maschine. Im Innern erkennt man den rotierenden Teil mit seinen Polhörnern. Die kreisförmige Magnetisierungsspule für ihn ist im Innern fest aufgestellt. In den äußeren Stahlmantel sind zwei zerteilte ringförmige Eisenkörper mit Nuten eingepaßt und in die Nuten sind die Ankerdrähte gewickelt.

Fig. 370.



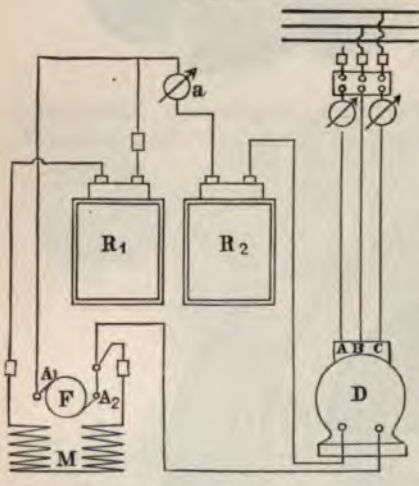
Zur Erregung der Magnetisierungsspule dient der Strom der kleinen Gleichstrommaschine, welche auf derselben Achse sitzt und vorn in der Figur sichtbar ist.

Wir haben so die wesentlichsten Konstruktionen der verschiedenen

Arten von Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen besprochen. Alle diese Maschinen sind jetzt durch sachgemäße Konstruktionen auf einen so hohen Grad von Vollkommenheit gebracht, daß ihr elektrischer Wirkungsgrad (S. 380) 85 bis 96 Proz. und mehr beträgt, so daß sie also den Gleichstromdynamos ebenbürtig sind.

Um die Spannung in den Wechselstrommaschinen zu ändern, reguliert man, wie bei den Nebenschlußmaschinen für Gleichstrom, den Erregerstrom der Magnete. Indem man diesen stärker oder schwächer macht, wird auch die Spannung des Wechselstromes stärker oder schwächer. Man nimmt als Erregermaschine zweckmäßig eine Compoundmaschine, deren Nebenschluß direkt mit den Magnetklemmen der Wechselstrommaschine verbunden ist, während in ihren Hauptstrom ein Regulator eingeschaltet wird. Wenn man zur Erregung der Magnete eine Gleichstromnebenschlußmaschine oder eine Compoundmaschine anwendet, so werden einerseits Regulierwiderstände in deren Magnetkreis eingeschaltet, andererseits Regulierwiderstände in die Feldmagnete der Wechselstrom- oder Drehstromdynamos. Die ersteren dienen zur groben, die letzteren zur feinen Regulierung der gewünschten Wechselspannung. Eine solche Schaltung einer Drehstromdynamo mit einer Erregermaschine zeigt Fig. 371. Man sieht links in der Figur die Erregermaschine, eine Nebenschlußmaschine, deren Anker mit F bezeichnet ist. In ihre Magnetbewickelung M ist der Regulierwiderstand R_1 eingeschaltet. Es geht ferner von dem Anker F aus der Strom einerseits vermittels der Bürste A_1 durch den Regulierwiderstand R_2 (und zunächst durch ein Amperemeter a), andererseits von der Bürste A_2 direkt zur Drehstromdynamo D, d. h. zu ihren Feldmagneten. Endlich geht von den Klemmen A, B, C der letzteren der Drehstrom aus, dessen 3 Leitungen durch Meßapparate zu 3 Schienen S_1 S_2 S_3, den Sammelschienen, auf dem Schaltbrett geführt werden.

Fig. 371.



Wie bei den Gleichstrommaschinen hat man auch bei den Wechselstrom- und Drehstrommaschinen die Rückwirkung des Ankerstromes auf die Feldmagnete zu beachten, die auch hierbei sehr merkwürdige Erscheinungen hervorbringen. Zunächst sollte man zwar glauben, daß eine Ankerrückwirkung hier nicht stattfindet und zwar deswegen, weil ja der Ankerstrom ein Wechselstrom ist, während die Magnete Gleichstrom enthalten. Aber eine genauere Betrachtung zeigt, daß sie trotzdem auch hier stattfinden muß. Nehmen wir z. B., um die Vorstellungen zu fixieren, an, daß wir eine Maschine haben, deren Magnete sich drehen, während der Anker fest ist. Sie habe etwa 6 abwechselnde Magnetpole und 6 Spulen im Anker. Dem Nordpol I steht dann in einem bestimmten Moment eine

Spule 1 gegenüber, dem Südpol II die Spule 2. In diesem Moment fließt in den gesamten Ankerspulen ein Strom nach einer Richtung, der, da die Spulen jeweilig passend zusammengeschaltet sind, etwa den Nordpol I und den Südpol I verstärkt. Ist die Spule 1 bei der Drehung zum Südpol II gekommen, so würde sie zwar jetzt den Südpol II schwächen, wenn der Strom in ihr noch dieselbe Richtung hätte wie vorher. Die Stromrichtung aber hat ja unterdes gewechselt und infolgedessen verstärkt sie auch jetzt den Südpol, und die vorhergehende und nachfolgende Spule verstärken die gegenüberstehenden Nordpole. Man sieht also, daß der Wechselstrom des Ankers auf die Magnete doch immer in demselben Sinne wirkt, gerade wegen der Bewegung der Magnete. Es kommt also nun darauf an, ob der Ankerstrom bei seiner Rückwirkung das Magnetfeld verstärkt oder schwächt. Wenn nun der Ankerstromkreis bloß aus nicht induktiven Widerständen besteht, so wissen wir (S. 253), daß dann der erzeugte Strom dieselbe Phase hat wie die Spannung. Wenn dann ein Magnetpol sich von einer Spule zur nächsten bewegt, so wird der Ankerstrom zuerst den Magnetismus schwächen (entmagnetisierend wirken), bis der halbe Weg zurückgelegt ist, und dann auf der anderen Hälfte des Weges verstärken. Im Mittel heben sich also die Wirkungen des Ankers auf. Wenn dagegen der Anker induktiv geschlossen ist, dann bleibt der Strom hinter der Spannung zurück, die Dauer des Entmagnetisierens wird verlängert, die des Magnetisierens verkürzt, im Mittel werden also die Magnete geschwächt und es findet eine Spannungsverminderung infolge der Ankerrückwirkung statt. Wenn aber umgekehrt in den Ankerkreis Kapazitäten eingeschaltet sind, so ist der Strom der Spannung voreilend (S. 258), die Magnetisierungsperiode wird verlängert, die Entmagnetisierungsperiode verkürzt und es entsteht das merkwürdige Resultat, daß die Spannung der Maschine durch die Ankerrückwirkung sogar erhöht wird. Es findet eine Spannungserhöhung statt.

Man muß also in jedem dieser Fälle, wenn man konstante Spannung nach Einschalten des äußeren Stromkreises behalten will, den Erregerstrom der Magnete nachregulieren, nicht bloß wegen des Spannungsverlustes durch den Widerstand und die Selbstinduktion im Anker selbst, sondern auch wegen dieses Spannungsverlustes resp. Spannungsgewinnes durch die Ankerrückwirkung.

Zur Messung der Spannung der Wechsel- und Drehströme, sowie der Stromstärke in den Leitungen werden auch hier Voltmeter und Amperemeter direkt in der Nähe der Maschine angebracht. Und dabei hat man bei gewöhnlichem (einphasigem) Wechselstrom, ganz ebenso wie bei Gleichstrom, nur je ein Voltmeter und ein Amperemeter anzuwenden. Das Voltmeter wird an die Klemmen der Maschine, im Nebenschluß zum Hauptstromkreis angelegt, das Amperemeter kommt direkt in eine Leitung des Hauptstromes. Dagegen bei Drehstrom, wo man drei Leitungen hat, hat man die Spannung zwischen je zweien der drei Leitungen (1 und 2, 1 und 3, 2 und 3) zu messen und die Stromstärke in jedem Zweige. Für den letzteren Zweck hat man also in jede Leitung des Hauptstromes ein Amperemeter einzuschalten. Für die Spannungsmessung hat man ebenso je ein Voltmeter in den Nebenschluß zwischen die Klemmen 1 und 2, 1 und 3, 2 und 3 zu legen.

Die technischen Meßapparate für Wechselströme sind zum Teil dieselben wie die für Gleichströme. Wenn ein Meßapparat auf der Bewegung eines Stückes von weichem Eisen unter dem Einfluß eines Stromes beruht, wie z. B. die Apparate der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, die oben S. 383 beschrieben wurden, so läßt er sich für Wechselströme auch verwenden. Denn das Eisenstückchen wird jedenfalls in die Spule hineingezogen, ob diese nun von einem Strom in der einen oder in der anderen Richtung durchflossen wird, also auch, wenn sie von einem Wechselstrom durchflossen wird. Nur muß die Skala des Instrumentes für den Wechselstrom besonders geeicht sein, und eine solche Skala ist im allgemeinen nur richtig für eine bestimmte Periodenzahl des Wechselstromes, nicht für andere, selbstverständlich wegen des Einflusses der Selbstinduktion. Fig. 372 zeigt einen derartigen Stromzeiger von Siemens & Halske geöffnet. Man sieht eine aus dicken Kupferbändern gebildete Spule s, in welche der Weicheisenkern eintaucht, der mit einem Zeiger z verbunden ist und auf einer Stahlachse, die in Saphiren spielt, sich drehen kann. Fig. 373 zeigt den Eisenkern selbst, ein Plättchen aus Weicheisen e, welches mit dem Zeiger z, der vor der Skala spielt, und mit der Dämpferplatte d verbunden ist. Dieser Dämpfer ist derselbe, der S. 244 beschrieben war. Man sieht in Fig. 372 das Messingrohr r, in der sich die Dämpferplatte bewegt. Das Eisenplättchen ist drehbar angebracht, jedoch so, daß die Drehungsachse exzentrisch liegt. Geht ein Strom durch die Spule, so dreht sich daher das Eisenplättchen um seine Achse so weit, bis das Gewicht des Plättchens der elektromagnetischen Kraft das Gleichgewicht hält, und der Zeiger zeigt auf einer Skala, die man geeicht hat, die entsprechende Stromstärke oder, wenn das Instrument im Nebenschluß gebraucht wird, die entsprechende Spannung an.

Fig. 372.

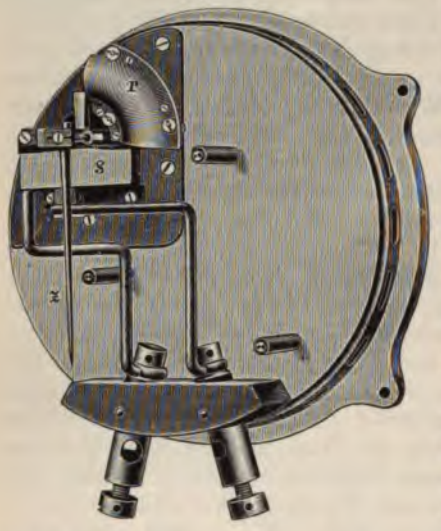


Fig. 373.

Wie gesagt, sind diese Instrumente, weil die Spulen für den Strom immer Selbstinduktion besitzen, nicht unabhängig von der Periode der Wechselströme. Eine Skala, die für eine Periodenzahl 50 richtig geeicht ist, ist nicht mehr richtig für 40 oder 80 Perioden in der Sekunde. Unabhängig von der Periodenzahl wird man nur durch Instrumente, welche eine verschwindend kleine Selbstinduktion besitzen. Dies ist der Fall bei den sogenannten Hitzdrahtmeßinstrumenten, welche von Hart-

mann & Braun in Frankfurt a. M. sowohl für wissenschaftliche als auch für die hier erörterten technischen Messungen konstruiert werden. Diese Apparate beruhen darauf, daß ein Draht, der von einem Strom durchflossen wird — gleichgültig ob von Gleichstrom oder Wechselstrom —, infolge der Jouleschen Wärme erwärmt und dadurch etwas ausgedehnt wird, da ja bei steigender Temperatur alle Körper länger werden. Diese Längenänderung ist nun umgekehrt ein Maß für die Stromstärke, die durch den Draht fließt. Der Hitzdraht besteht bei diesen Instrumenten aus einem kurzen Platinsilberdraht, die kleine Verlängerung, die er erfährt, bewirkt eine Drehung einer Achse, mit der er verbunden ist, und diese Drehung wird durch einen Zeiger, der vor einer Skala spielt, abgelesen. Um die sehr kleinen Längenänderungen des „Hitzdrahtes" so auf den Zeiger zu übertragen, daß dieser dabei eine große Drehung macht, ist die Einrichtung so getroffen, wie sie aus Fig. 374 hervorgeht. Der dünne Platinsilberdraht d von 0,06 mm Durchmesser ist an beiden Enden s und s_1 festgeklemmt. Ungefähr in der Mitte des Drahtes ist ein dünner Messingdraht m von 0,05 mm Durchmesser befestigt, dessen anderes

Fig. 374.

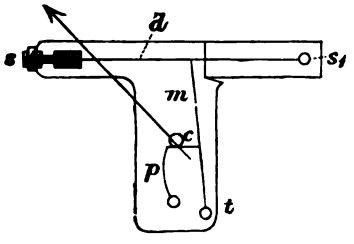
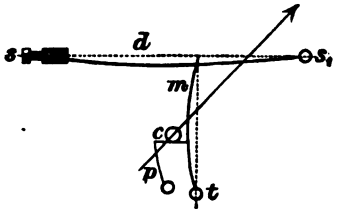


Fig. 375.

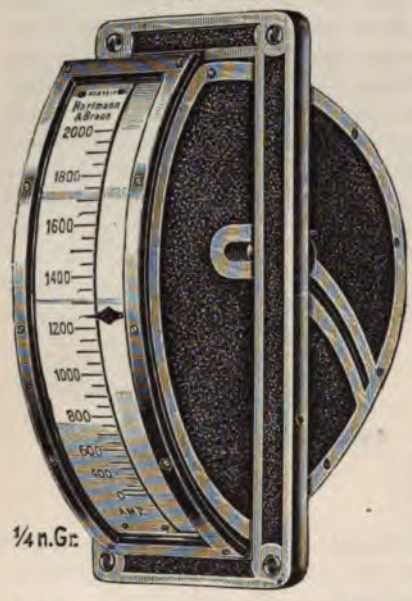


Ende bei t festgeklemmt ist. Von der Mitte dieses Drahtes nun ist ein feiner Kokonfaden um eine drehbare Rolle c geschlungen und zu einer Feder p geführt, welche das ganze System, die beiden Drähte und den Kokonfaden stets gespannt hält. An der Rolle ist der Zeiger befestigt. Wird nun, wie Fig. 375 zeigt, der Draht d von einem Strom durchflossen, also erwärmt und verlängert, so spannt die Feder p ihn und den Draht m, buchtet sie aus, und die Rolle c mit dem Zeiger dreht sich. Wenn man die Stellungen des Zeigers auf der Skala bei bestimmten Stromstärken bestimmt, also das Instrument geeicht hat, so kann man dasselbe zu Messungen benutzen. Diese Instrumente, die von Magneten oder Starkströmen in der Nähe nicht beeinflußt werden, lassen sich natürlich für Gleichstrom ebenso brauchen wie für Wechselstrom. Bei letzteren ist die Periodenzahl ohne Einfluß, weil der kurze Hitzdraht keine merkliche Selbstinduktion besitzt. Da man durch den dünnen Hitzdraht nur schwache Ströme senden darf, so wird das Instrument zunächst im Nebenschluß als Voltmeter gebraucht, wobei man, wenn die zu messende Spannung hoch ist, noch Vorschaltwiderstände zu dem Instrument legt. Für Strommessungen läßt man den zu messenden Strom durch einen gemessenen kleinen Widerstand gehen und schaltet den Hitzdraht parallel zu diesem, so daß man in Wirklichkeit die Spannung an den Enden eines bekannten kleinen Widerstandes mißt. Da die Stromstärke in diesem Widerstand gleich dieser

Spannung dividiert durch den bekannten Widerstand ist, so kann man bei bekanntem Nebenschluß das Instrument gleich in Ampere eichen.

Die äußere Form dieser Instrumente unterscheidet sich nicht wesentlich von der der anderen Schalttafelinstrumente. In neuerer Zeit bringt man die Meßinstrumente häufig als Profilinstrumente, um Platz zu sparen, an den Schalttafeln an, über welche diese herausragen. Für die Hitzdrahtinstrumente zeigt Fig. 376 eine solche Anordnung.

Fig. 376.



Für sehr hohe Spannungen, wie sie jetzt bei Wechselstromanlagen zuweilen benutzt werden, für Spannungen von mehreren Tausend Volt, kann man auch leicht Voltmeter benutzen, welche gar keine Selbstinduktion besitzen, nämlich die gewöhnlichen Elektrometer. Solche Apparate werden in der Technik zuweilen unter dem Namen „elektrostatische Voltmeter" angewendet, und Fig. 377 zeigt ein solches von Siemens & Halske. Dasselbe ist ähnlich wie das Quadrantelektrometer (S. 39) eingerichtet. Es enthält zwei feste metallische Quadrantenplatten, zwischen denen die Nadel sich um eine horizontale Achse dreht. Die Quadranten sind miteinander fest verbunden. Sie werden mit dem einen Pol der Maschine, die Nadel wird mit dem anren Pol in Kontakt gebracht. Bei den hohen Spannungen dreht sich die Nadel und der Ausschlag hängt von dem Spannungsunterschied der beiden Leitungen ab, mißt also direkt diese Spannung, die man durch Eichen des Instrumentes in Volt ausdrückt. Um für jede Spannungsdifferenz einen bestimmten Ausschlag zu haben, muß eine Gegenkraft der elektrischen Anziehung entgegenwirken. Dies tut hier die Schwerkraft, indem auf den Hebel, der unten an der Nadel bei s sichtbar ist, kleine Gewichte aufgesetzt werden. Je nach diesem Gewicht ist die Empfindlichkeit des Instrumentes verschieden.

Fig. 377.

Bei einer Gleichstrommaschine weiß man durch Ablesung des Volt-

meters und Amperemeters sofort, wie groß der elektrische Effekt ist, den die Maschine im äußeren Stromkreis erzeugt. Denn dieser Effekt ist einfach das Produkt aus den Ampere und Volt und er ist dann schon in Watt ausgedrückt. Bei einer Wechselstrommaschine aber weiß man, wenn man auch die (effektiven) Volt und Ampere bestimmt hat, noch nicht, wie groß der gelieferte Effekt in Wirklichkeit ist, weil dabei noch der Phasenfaktor hinzukommt (S. 254), welcher abhängig ist von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Man muß also den Effekt einer solchen Maschine noch direkt messen, und das geschieht durch die Wattmeter, von denen wir S. 255 gesprochen haben. Bei Wechselstrommaschinen findet man deshalb häufig drei Instrumente angebracht: ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Wattmeter. Bei Drehstrommaschinen braucht man für jeden Zweig solche Apparate, die aber zum Teil verbunden sind, worauf wir hier nicht eingehen können. Fig. 378 zeigt ein solches Wattmeter von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M., welches im Prinzip genau so gebaut ist wie die S. 255 beschriebenen Apparate, welches aber als Schaltbrettinstrument ausgebildet ist und dessen Skala gleich Kilowatt abzulesen gestattet. Hat man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Wattmeter zugleich an einer Wechselstromleitung angebracht, so kann man sofort den Phasenfaktor bestimmen, den der Stromkreis besitzt. Denn das Produkt aus den abgelesenen Volt und den Ampere multipliziert mit dem Phasenfaktor muß gleich den wirklich gemessenen Watt sein.

Fig. 378.

Die Wechselströme bieten dem Verständnis weit mehr Schwierigkeiten als die Gleichströme. Sie boten auch noch bis vor kurzem der praktischen Benutzung ziemlich erhebliche Schwierigkeiten. So z. B. gelang es noch vor wenigen Jahren nicht oder nur ausnahmsweise, zwei Wechselstrommaschinen parallel zu schalten. Es mußte erst ein tiefgehendes Studium der Eigenschaften der Wechselströme Klarheit in viele Verhältnisse bringen. Jetzt aber steht die Technik des Wechselstromes vollkommen der Technik des Gleichstromes ebenbürtig da. Zunächst sind, worauf es uns hier ankommt, die Dynamomaschinen für das eine System genau ebenso leistungsfähig wie für das andere System.

Beide Arten setzen heute 85 bis 93 Proz. der von Maschinen auf sie übertragenen Arbeit in elektrische Energie um.

Daraus kann man nun sofort die Überlegenheit der Elektrizitätserzeugung in Dynamomaschinen, seien es Gleichstrom- oder Wechselstrommaschinen, gegenüber der in galvanischen Elementen ersehen.

In den galvanischen Elementen wird immer die negative Elektrode, Zink, in der Säure aufgelöst. Jedes Quantum von elektrischer Energie, das man in einem geschlossenen galvanischen Element erhält, ist hervorgebracht durch die Verbrennung (Oxydation) einer äquivalenten Menge Zink in Schwefelsäure. Bei den Dynamomaschinen dagegen werden die elektrischen Ströme hervorgebracht durch die Drehung des Ankers oder der Magnete, also durch die Arbeit, welche man auf die Maschine aufwendet. Dreht man sie durch eine Gasmaschine oder Dampfmaschine, so werden die elektrischen Ströme indirekt hervorgebracht durch die Verbrennung der Kohlen oder des Leuchtgases, welche in den Arbeitsmaschinen zur Verwendung kommen. Es läßt sich eine einfache Rechnung anstellen, welche das Verhältnis der Kosten von elektrischen Strömen, einerseits bei der Erzeugung durch galvanische Elemente, andererseits bei der Erzeugung durch Dynamomaschinen vergleichen läßt, wenn diese durch Dampf- oder Gasmaschinen getrieben werden. Man kann nämlich diese Kosten vergleichen, wenn man annimmt, daß alle Elektrizität, welche eine Dynamomaschine liefert, und ebenso alle, welche ein galvanisches Element liefert, durch den Widerstand in Joulesche Wärme verwandelt wird, und dann diese Wärmemenge vergleicht und ihre bezüglichen Kosten ermittelt. Ein Kilogramm Zink liefert, wenn es vollständig verbrennt, eine Wärmemenge von 550 Kalorieen (Wärmeeinheiten). Nehmen wir an, daß diese Wärme vollständig in Elektrizität umgesetzt wird, was auch nahezu der Fall sein wird. Ein Kilogramm Kohle dagegen gibt bei der Verbrennung 8000 Kalorieen. Von diesen 8000 Kalorieen werden aber nur etwa 8 Proz. in den Dampfmaschinen faktisch nutzbar verwendet, also 640 Kalorieen, und von diesen 640 Kalorieen, resp. ihrer entsprechenden Arbeit, werden etwa 10 Proz. auf die Überwindung der Reibung der Dynamomaschine und auf unproduktive Erwärmung verwendet, während 90 Proz., also etwa 570 Kalorieen, in Elektrizität verwandelt werden. Ein Kilogramm Zink liefert also eine Menge elektrische Energie, welche 550 Kalorieen, ein Kilogramm Kohle eine solche, welche 570 Kalorieen entspricht. Nun ist aber der Preis von Zink ungefähr 15mal so hoch als der von Kohle, so daß dieselbe elektrische Energiemenge durch Kohlenverbrennung für weniger als den 15. Teil der Kosten hergestellt wird, als durch Oxydation von Zink.

Damit ist die Überlegenheit der Dynamomaschinen über die galvanischen Elemente für Anwendungen im großen konstatiert.

3. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

Eine ganze Reihe von Wirkungen des elektrischen Stromes, die lange bekannt waren, hat erst durch die Vervollkommnung der Dynamomaschine, seitdem es auf einfache Weise möglich wurde, beliebig starke Ströme zu erzeugen, eine erhöhte Bedeutung gewonnen, indem man in ihnen die Mittel erkannte, um gewisse technische Aufgaben mit Hilfe der Elektrizität zu lösen, die mit den früheren Mitteln der Technik stets erfolglos angestrebt wurden. Die beiden hauptsächlichsten derartigen Aufgaben sind die Übertragung von Kraft oder richtiger Arbeit auf weite Entfernungen und die Aufspeicherung von gerade unverwendbarer Arbeit zu späterer Benutzung. Die letztere Aufgabe gerade, ein lang berühmtes Problem der Technik, hat durch die Elektrizität eine Lösung erfahren, deren Prinzip vollkommen abweicht von den Prinzipien aller früheren Lösungsversuche dieser wichtigen Frage.

Wenn ein elektrischer Strom, und zwar ein Gleichstrom, durch einen Zersetzungsapparat, ein Voltameter, geschickt wird, in welchem verdünnte Schwefelsäure sich befindet, so wissen wir, daß die Elektroden, z. B. die Platinelektroden, sich polarisieren. An der negativen Elektrode lagert sich Wasserstoff an, an der positiven Sauerstoff. Diese beiden so veränderten Elektroden sind dadurch gegeneinander elektromotorisch wirksam geworden. Sie haben eine Spannungsdifferenz in der verdünnten Schwefelsäure erhalten, und wenn man sie durch einen äußeren Schließungsdraht miteinander verbindet, so fließt daher durch diesen geschlossenen Kreis ein galvanischer Strom, der Polarisationsstrom. Wir haben also durch den elektrischen Strom, den wir hineingesendet haben, den primären Strom, wie man ihn nennt, die Zersetzungszelle gewissermaßen selbst zu einem galvanischen Element gemacht, zu einem Element, das, wie jedes andere, eine ganz bestimmte elektromotorische Kraft hat. Man nennt dann die so polarisierte Zersetzungszelle ein sekundäres Element. In diesem sekundären Element ist die mit Wasserstoff beladene Platinplatte für den Strom im Innern des Elements die positive Platte. Verbindet man daher die beiden Platinplatten miteinander durch einen äußeren Schließungsdraht, so durchfließt der sekundäre positive Strom das sekundäre Element in entgegengesetzter Richtung, als es der primäre positive Strom durchflossen hat.

Daraus folgt erstens, daß, solange das primäre Element und die Zersetzungszelle miteinander verbunden sind, die Ströme aus beiden durch den Verbindungsdraht gegeneinander fließen und sich schwächen.

Daraus folgt weiter, daß die elektromotorische Kraft des primären Stromes mindestens ebenso groß sein muß, als die des vollständig polari-

sierten sekundären Elements, um dieses eben vollständig polarisieren zu können. Solange nämlich die elektromotorische Kraft der primären Batterie unter dieser Grenze liegt, kann die Zersetzungszelle nicht vollständig polarisiert werden, weil sich eben die Ströme dabei noch gegenseitig vollkommen aufheben. Also um ein sekundäres Element herzustellen, muß der primäre Strom eine elektromotorische Kraft haben, welche mindestens gleich ist der höchsten elektromotorischen Kraft, welche das sekundäre Element annehmen kann.

Denken wir uns nun ein sekundäres Element hergestellt und seine Verbindung mit dem primären Strom unterbrochen, dann haben wir ein Element, dessen positive Elektrode für den Strom im Innern der Flüssigkeit das mit Wasserstoff beladene Platin, dessen negative das mit Sauerstoff beladene ist. Sowie nun die Elektroden durch einen äußeren Draht miteinander verbunden werden, also der Stromkreis geschlossen wird, fließt der Strom hindurch, und zwar innen von der wasserstoffbeladenen Platte zur sauerstoffbeladenen, außen umgekehrt. Dieser Strom übt, wie jeder Strom, auf die Schwefelsäure des Elements seine elektrolytische Wirkung aus. Aus der Schwefelsäure scheidet sich (durch sekundäre Prozesse) Wasserstoff und Sauerstoff ab, und zwar scheidet sich innerhalb des Elements der Wasserstoff an derjenigen Elektrode ab, welche mit Sauerstoff beladen war, der Sauerstoff an derjenigen, welche mit Wasserstoff beladen war. Folglich *vermindert* sich durch den Strom die Polarisation der Elektroden und daher muß der Strom, den das Element liefert, schließlich aufhören, wenn aller Wasserstoff von der einen und aller Sauerstoff von der anderen Elektrode sich wieder zu Wasser verbunden haben. Je mehr Wasserstoff und Sauerstoff also von dem primären Strom auf den Platinplatten abgelagert wurden, je länger also die *Ladung* gedauert hat, um so länger hält der Polarisationsstrom an, vorausgesetzt natürlich, daß der Wasserstoff und Sauerstoff auch wirklich an den Elektroden haften und nicht etwa in die Luft gehen.

Diese Tatsachen, welche wir schon auf S. 149 ff. angeführt haben, gelten nun nicht nur für den Fall, daß Platinelektroden in Schwefelsäure stehen und durch den Strom polarisiert werden. Vielmehr entsteht in jedem Falle, wenn eine Flüssigkeit zwischen zwei gleichen oder ungleichen Elektroden elektrolysiert wird, ein Polarisationsstrom, falls eben die beiden Elektroden durch die Polarisation elektrisch different gegeneinander geworden sind. Bei der Polarisation einer gewöhnlichen Wasserzersetzungszelle findet scheinbar keine chemische Veränderung der Platinelektroden statt, sie beladen sich nur mit Gasen. Man kann von vornherein vermuten, daß eine Zersetzungszelle, in welcher durch die Elektrolyse die Elektroden wirklich *chemisch* different werden, noch zweckmäßiger sein werde. Natürlich ist eine notwendige Voraussetzung dabei, daß diejenigen Stoffe, welche durch Elektrolyse an den Elektroden entstehen, auch gute Leiter der Elektrizität sind, denn sonst würde der innere Widerstand des Elements ein sehr großer, also der Strom stets schwach werden.

Das Verdienst nun, durch sehr viele und sorgfältige Versuche zuerst ein sehr zweckmäßiges sekundäres Element hergestellt zu haben, hat *Gaston Planté*. Er fand nämlich, daß sich das *Blei* ganz besonders für sekundäre Elemente eigne. Planté tauchte zwei Bleiplatten

in verdünnte Schwefelsäure und sendete durch dieses System den primären Strom. Dabei zerlegt sich, wenn wir vorläufig nur die Hauptprozesse in Betracht ziehen, die Schwefelsäure (SO_4H_2) in Wasserstoff, H_2, und das nicht frei bestehende SO_4. Von diesem letzteren wird sofort ein Sauerstoffatom durch das Blei weggenommen. Je zwei solcher Sauerstoffatome verbinden sich nämlich mit einem Atom Blei zu Bleisuperoxyd (PbO_2), während die übrigbleibende wasserfreie Schwefelsäure SO_3 sofort Wasser aus der Lösung aufnimmt und wieder zu SO_4H_2 wird. Das Resultat der Elektrolyse ist also, daß an derjenigen Bleielektrode, welche mit der negativen Elektrode der primären Batterie verbunden ist, sich freier Wasserstoff abscheidet, während an der positiven Elektrode sich Bleisuperoxyd bildet. War die negative Elektrode vorher oxydiert (durch Stehen an der Luft oder auf andere Weise), so nimmt der an ihr sich entwickelnde Wasserstoff diesen Sauerstoff weg, er reduziert sie und macht sie zu reinem metallischen Blei. Wenn also die Polarisation vollständig ist, ist aus dem System ein galvanisches Element geworden, bestehend aus

Bleisuperoxyd | verdünnte Schwefelsäure | Blei.

Ein solches Element hat, wie jedes andere, eine bestimmte elektromotorische Kraft. Diese ist, wie die Versuche zeigen, gleich 2 Volt. Wenn das Element aber eben erst gebildet ist, so ist die negative Bleielektrode noch mit Wasserstoff bedeckt, dann hat man also das Element.

Bleisuperoxyd | Schwefelsäure | wasserstoffbeladenes Blei

und dessen elektromotorische Kraft ist größer, nämlich gleich 2,2 bis 2,4 Volt.

Wird ein solches Element durch einen äußeren Stromkreis geschlossen, so fließt also infolge der elektromotorischen Kraft ein Strom durch den äußeren Stromkreis und durch das Element selbst. Dieser zerlegt durch Elektrolyse wieder die Schwefelsäure, und es bildet sich jetzt an dem Bleisuperoxyd Wasserstoff, während an der reinen Bleiplatte sich Sauerstoff bildet. Dadurch wird das Bleisuperoxyd zu Bleioxyd (PbO) reduziert, aber sofort auch durch die Schwefelsäure in Bleisulfat ($PbSO_4$) umgewandelt, und ebenso wird die reine Bleiplatte zu Bleioxyd oxydiert und gleich in Bleisulfat (schwefelsaures Blei) verwandelt. Der Strom hört auf, wenn beide Platten an der Oberfläche in Bleisulfat verwandelt sind. Die gesamte Menge des zuerst erzeugten Bleisuperoxydes hängt nun ab von der Stärke und Dauer des primären Stromes, also von der gesamten Elektrizitätsmenge, welche während der Ladung des sekundären Elements von dem primären Strom hineingesendet wurde. Die gesamte Elektrizitätsmenge, die das sekundäre Element im ganzen abgeben kann, kann also nicht größer, sondern höchstens gleich sein der gesamten Elektrizitätsmenge, die von dem ladenden Strome hineingegeben wurde.

Um ein solches sekundäres Element herzustellen, genügt es aber nicht, einfach zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure zu tauchen, sie zu laden und dann den Polarisationsstrom zu benutzen. Dieser wäre dann von sehr geringer Dauer und von sehr rasch abnehmender elektromotorischer Kraft. Man muß vielmehr, wie Planté gezeigt hat, das Element erst b e h a n d e l n , f o r m i e r e n. Es kommt ja darauf an, daß die eine Bleiplatte durch den an sie herantretenden Sauerstoff mög-

lichst vollständig in Bleisuperoxyd verwandelt werde. Der Sauerstoff aber entwickelt sich aus der Schwefelsäure an der Oberfläche des Bleis und greift infolgedessen ganz vorzugsweise zuerst nur die Oberflächenschicht an. Es ist also jedenfalls notwendig, wie es Planté getan hat, den Bleiplatten des sekundären Elements eine große Oberfläche zu geben. Aber man muß auch dafür sorgen, daß der Sauerstoff auch in die Bleiplatte hineindringt und sie auch innen oxydiert. Damit dies nun möglich sei, ist es notwendig, das Blei gewissermaßen aufzulockern, es zu disaggregieren, damit es den Sauerstoff leicht aufnehmen kann. Dies erreichte Planté dadurch, daß er ein Element nicht auf einmal, sondern der Reihe nach an vielen Tagen, sogar monatelang, lud und dann durch Schließung wieder entlud. Dadurch dringt der Sauerstoff von Tag zu Tag etwas tiefer in das Blei ein, und bei jeder neuen Ladung wird dann etwas mehr von der gesamten Masse des Bleis in Superoxyd verwandelt. Ferner erwies sich als vorteilhaft bei der Behandlung, das Element von Tag zu Tag in entgegengesetztem Sinn zu laden. Durch die entgegengesetzte Ladung wird das Bleisuperoxyd wieder zu Blei, und zwar in körniger und poröser Form, so daß bei nachheriger Ladung der Sauerstoff nun leicht bis dahin eindringen kann. In dieser angegebenen Weise behandelte Planté seine Elemente viele Monate lang. Erst dann erreichten sie das Maximum ihrer Wirksamkeit. N a c h dieser Behandlung, also bei einem fertigen Plantéschen Element, genügt eine einmalige Ladung, um dasselbe in gebrauchsfähigen Zustand zu versetzen.

Ist nun ein solches Plantésches Element geladen, sind also seine Bleielektroden chemisch verändert, so gibt es zu jeder Zeit, wenn man die Elektroden durch einen Schließungskreis verbindet, einen elektrischen Strom, einen Strom, der annähernd im ganzen dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich führt, wie der ladende Strom. Solange die Bleielektroden chemisch verändert sind, so lange enthält das Element die Fähigkeit in sich, einen Strom zu liefern. Die chemische Veränderung bleibt nun, wenn das Element ungeschlossen gehalten wird, lange Zeit mehr oder minder vollständig bestehen. Es ist dann also möglich, eine gewisse Elektrizitätsmenge dadurch, daß man sie zum Laden eines Plantéschen Elementes verwendet, gewissermaßen eine Zeitlang aufzuheben. Die Elektrizität ist in Form von chemischer Veränderung in dem Element aufgespeichert und kann nach einiger Zeit wieder aus demselben herausgezogen werden. Ein solches sekundäres Element ist also gewissermaßen ein Speicher für eine bestimmte Elektrizitätsmenge, es dient zur A u f s p e i c h e r u n g v o n E l e k t r i z i t ä t. Man nennt deshalb auch die sekundären Elemente A k k u m u l a t o r e n (S a m m l e r). Die höchste Ladung, die ein Akkumulator aufnehmen kann, bezeichnet man als seine K a p a z i t ä t.

Die Plantéschen Elemente brauchen, wie gesagt, eine umständliche Vorbereitung, Formierung, bevor sie ihre vollständige Kapazität erlangen. Dieses Verfahren suchte F a u r e auf eine sinnreiche Weise abzukürzen. Er umgab nämlich die beiden Bleielektroden von vornherein mit einer Schicht von Mennige, welche ja an sich schon eine Sauerstoffverbindung des Bleis ist. Die Mennige ist ein lebhaft rotes Pulver, welches gewöhnlich als eine Verbindung von Bleioxyd (PbO) und Bleisuperoxyd (PbO_2)

angesehen wird und dem man die Formel gibt Pb_2O_3. Dieses Pulver wurde nun nach Faure mit Wasser zu einem dicken Brei angerieben und auf jede Elektrode dieser Brei aufgestrichen, welcher dann durch einen Filzüberzug auf der Platte festgehalten wurde. Wird nun das Element geladen, so wird auf der positiven Elektrode durch Sauerstoffaufnahme die schwammige Mennige vollständig in Bleisuperoxyd verwandelt (aus $Pb_2O_3 + O$ wird $2\,PbO_2$), während auf der negativen Elektrode die Mennige durch den Wasserstoff zu reinem Blei reduziert wird. Dadurch, daß die Mennige pulverförmig ist, können die Gase mit Leichtigkeit nicht nur an die Oberfläche derselben, sondern auch in das Innere derselben gelangen, und so geht die chemische Veränderung durch den Ladungsstrom rasch vollständig von statten. Nach zwei- bis dreimaliger Ladung und Entladung hat das Element sein Maximum an Kapazität erreicht. Ist das aber geschehen, ist die Mennige einmal vollständig zu Bleisuperoxyd auf der einen Elektrode oxydiert und zu reinem Blei auf der anderen Elektrode reduziert worden, und ist das Element einmal entladen, so kann jede neue Ladung es wieder zu seiner vollständigen Wirksamkeit bringen.

Durch diesen Kunstgriff gelang es also Faure, die Behandlung eines Elements bis zur vollständigen Wirksamkeit viel einfacher und kürzer zu gestalten, als es Planté getan hatte. Dafür aber zeigte es sich sehr bald, daß die Haltbarkeit der nach dem Faureschen Verfahren hergestellten Akkumulatoren eine viel geringere war, weil die Pulverschichten von den Platten abfielen, so daß die großen Hoffnungen, die man auf Faures Erfindung setzte, nicht in Erfüllung gingen, bevor nicht noch viele weitere Studien zu Hilfe kamen.

Es bedurfte einer eingehenden Untersuchung der Vorgänge in den Akkumulatoren, sowohl bei der Ladung als bei der Entladung, ehe es gelang, Konstruktionen von Akkumulatoren zu finden, welche eine wirkliche technische Verwendung derselben im großen mit wirklichem Nutzen gestatten.

Zunächst zeigt es sich, daß der chemische Vorgang in einem Akkumulator nicht so einfach ist, wie oben angenommen wurde. Wenn ein Akkumulator formiert ist, so ist seine positive Platte bedeckt mit Bleisuperoxyd, mit der wirksamen Masse, welche schokoladenfarben aussieht, während die negative Platte aus Blei und zwar in aufgelockertem Zustand, Bleischwamm, besteht und grau aussieht. Wird nun das Element geschlossen, geht also der Entladungsstrom durch dasselbe, so wird zunächst durch den an der braunen Elektrode auftretenden Wasserstoff Bleioxyd (PbO) gebildet, nach der Formel

$$PbO_2 + 2\,H = PbO + H_2O$$

Bleisuperoxyd + 2 Wasserstoff = Bleioxyd + Wasser.

Das Bleioxyd aber verbindet sich sofort mit der Schwefelsäure zu schwefelsaurem Blei ($PbSO_4$) und Wasser nach der Formel

$$PbO + SO_4H_2 = PbSO_4 + H_2O$$

Bleioxyd + Schwefelsäure = Bleisulfat + Wasser.

Im ganzen entstehen also, wenn 2 Atome Wasserstoff (2 H) an die positive Platte herankommen, an dieser Elektrode auch 2 Moleküle Wasser,

nämlich zuerst eines bei der Reduktion des Bleisuperoxyds in Bleioxyd und dann noch eines bei der Bildung des Sulfats, also schreibt sich der ganze Vorgang an der positiven Platte

$$PbO_2 + SO_4H_2 + 2H = PbSO_4 + 2H_2O$$

Bleisuperoxyd + Schwefelsäure + 2 Wasserstoff = Bleisulfat + 2 Wasser.

An der negativen Elektrode, dem reinen Blei, entsteht durch den auftretenden Sauerstoff auch zunächst Bleioxyd, und dieses bildet sich mit der Schwefelsäure ebenfalls zu Bleisulfat und Wasser um, nämlich nach der Formel

$$Pb + SO_4H_2 + O = PbSO_4 + H_2O$$

Blei + Schwefelsäure + Sauerstoff = Bleisulfat + Wasser.

Der Prozeß bei der Entladung ist also folgender:

1. Ein Molekül Schwefelsäure wird elektrolytisch zerlegt, nach der Formel

$$SO_4H_2 = SO_3 + O + H_2.$$

Da SO_3 nicht frei bestehen kann, so nimmt es aus der Lösung 1 Molekül Wasser auf und bildet wieder SO_4H_2. Im ganzen wird also der Lösung 1 Molekül Wasser entzogen und O und H_2 treten an die Elektroden.

2. An beiden Elektroden bildet sich Bleisulfat und zugleich treten an der positiven Elektrode 2 Moleküle, an der negativen 1 Molekül Wasser in die Lösung ein, die sich also, abzüglich des einen vorher gebrauchten Moleküls, um 2 Moleküle Wasser bereichert.

Bei der Entladung wird also die Lösung verdünnt, indem sich der Wassergehalt vermehrt, der Gehalt an Schwefelsäure vermindert.

Bei der folgenden Ladung nun finden wir zwei mit Bleisulfat bedeckte Elektroden. Die Schwefelsäure in der Lösung wird zerlegt und das Resultat ist jetzt das umgekehrte. Ein Molekül Wasser wird der Lösung entnommen und der auftretende Wasserstoff an der negativen Elektrode bildet mit dem Bleisulfat Blei und 1 Molekül Schwefelsäure nach der Formel

$$PbSO_4 + H_2 = Pb + SO_4H_2$$

und an der positiven Elektrode verbindet sich der Sauerstoff mit dem Bleisulfat und 1 Molekül Wasser aus der Lösung zu Bleisuperoxyd und Schwefelsäure:

$$PbSO_4 + O + H_2O = PbO_2 + SO_4H_2.$$

Daher tritt nach der Ladung wieder Bleisuperoxyd und Blei an den Elektroden auf. Die Lösung der Schwefelsäure ist aber konzentrierter geworden, indem ihr 2 Moleküle Wasser entzogen, dafür aber 1 Molekül Schwefelsäure (SO_4H_2) zugeführt wurden.

Man ersieht daraus, daß während der Ladung die verdünnte Schwefelsäure immer konzentrierter wird, während sie bei der Entladung wieder mehr verdünnt wird. Da die konzentrierte Schwefelsäure größeres spezifisches Gewicht hat als die weniger konzentrierte, so kann man durch ein Aräometer, mittels dessen man das spezifische Gewicht bestimmt, immer den Grad der Ladung des Akkumulators fortlaufend kontrollieren.

Von den beiden Platten des Akkumulators bezeichnet man diejenige,

auf welcher Bleisuperoxyd abgelagert wird, als die positive, die andere, welche am Ende der Ladung reiner Bleischwamm wird, als die negative. Bei der Ladung ist die positive Platte mit dem positiven Pol der ladenden Batterie zu verbinden. Bei der Entladung geht der positive Strom nach außen von der positiven zur negativen Platte. Beide Platten werden durch die Schwefelsäure schon während des Stehens zum Teil in schwefelsaures Blei umgewandelt, oder, wie man sagt, sulfatiert. Schädlich ist diese Sulfatbildung namentlich an der positiven Platte, weil sich an ihr lokale Ströme zwischen dem Bleisuperoxyd und dem Bleisulfat bilden, welche das wirksame Bleisuperoxyd zerstören. Außerdem lockern diese Bleisulfatteilchen, die sich beim Stehen bilden, bei dem Faureschen Verfahren leicht, wenn man nicht besondere Vorsichtsmaßregeln trifft, die Verbindung der Mennige mit den Bleiplatten, so daß die Mennige sich allmählich von der Bleiplatte ablöst und so die wirksame Schicht vermindert wird. Dazu kommt noch, daß sich die abgefallenen Stücke auf dem Boden des Gefäßes sammeln und bald eine leitende Verbindung zwischen den beiden Platten, also einen Kurzschluß bilden. Aus diesem Grunde gingen die ersten Akkumulatoren, die nach dem Faureschen Verfahren hergestellt wurden, rasch zu Grunde und man lernte erst allmählich durch besondere Konstruktion und Anbringung der Bleiplatten dieser Übelstände Herr zu werden.

Ferner zeigte es sich, daß es für die Dauerhaftigkeit und den Nutzeffekt der Akkumulatoren durchaus nicht gleichgültig ist, ob sie mit starken oder schwachen Strömen geladen werden. Es wird ja bei der Ladung das Bleisuperoxyd einerseits und das reine Blei andererseits durch die Aufnahme der Gase, Sauerstoff und Wasserstoff, gebildet. Hat nun ein Akkumulator eine bestimmte Oberflächengröße seiner Elektroden, so können diese in jedem Zeitabschnitt nur eine bestimmte Menge Gas zu ihrer Umbildung (Oxydation oder Reduktion) brauchen. Wird mehr Gas entwickelt, so entweicht das nutzlos. Also dürfen die Ladungsströme nicht zu stark sein. Sie dürfen aber auch nicht zu schwach sein, weil bei der dann stattfindenden langsamen Oxydation die Lokalströme an der positiven Platte zu sehr wirksam werden. Es gibt also für jede Plattengröße eine bestimmte Stromstärke, bei welcher geladen werden soll, und diese wird jetzt von den Fabriken immer angegeben.

Die gesamte Elektrizitätsmenge, die in einem bestimmten Akkumulator aufgespeichert ist, bezeichnet man, wie gesagt, als die Kapazität des Akkumulators. Und zwar versteht man genauer unter der Kapazität eines Akkumulators die gesamte Elektrizitätsmenge, welche der Akkumulator in Form von Strom bei der Entladung abgeben kann. Man drückt diese gewöhnlich in Amperestunden aus. Ein Element z. B., welches eine Kapazität von 600 Amperestunden hat, kann einen Strom von 120 Ampere 5 Stunden lang geben, oder einen Strom von 60 Ampere 10 Stunden lang u. s. w. Natürlich soll dabei die höchste zulässige Stromstärke nicht überschritten werden.

Wie viel Elektrizität in einem Akkumulator aufgespeichert werden kann, wie groß also seine Kapazität ist, das hängt natürlich von seiner Größe ab. Eine wesentlichere Frage ist aber die, wie viel von der aufgespeicherten elektrischen Energie bei der Entladung wieder nutzbar

abgegeben werden kann. Das Verhältnis der abgegebenen zur aufgewendeten Energie nennt man den Nutzeffekt des Akkumulators. Dieser Nutzeffekt wird um so größer, je besser präpariert das Element ist.

Um die Menge der aufgespeicherten Energie zu finden, bestimmt man die Spannung an den Polen des Elements während der Ladung und die Stärke des Stromes, mit dem man ladet. Das Produkt dieser Größen gibt die in jeder Sekunde auf den Akkumulator übertragene elektrische Energie in Watt. Diese, multipliziert mit der gesamten Ladungszeit, gibt die gesamte aufgespeicherte Energie. Man drückt diese gewöhnlich in Wattstunden aus, indem man den Effekt in Watt mit der Ladungszeit in Stunden multipliziert.

Ebenso bestimmt man die bei der Entladung des Akkumulators abgegebene Energie als das Produkt aus der Spannung des Akkumulators bei der Entladung, der Stromstärke bei der Entladung und der Entladungszeit. Auch diese Energie wird in Wattstunden ausgedrückt. Das Verhältnis der Zahl Wattstunden bei der Entladung zu der bei der Ladung ist also der Nutzeffekt des Akkumulators.

Ein Beispiel wird diese Berechnung klar machen. Einer von den unten beschriebenen Hagener Akkumulatoren wurde 10,16 Stunden lang mit einem Strom von 5 Ampere geladen. Die mittlere Spannung des Akkumulators war dabei 2,15 Volt. Mithin war die aufgespeicherte Energie:

$$10{,}16 \times 2{,}15 \times 5 = 109{,}2 \text{ Wattstunden.}$$

Bei der Entladung hatte der Akkumulator eine Spannung von 1,88 Volt im Mittel und gab einen Strom von 6,5 Ampere. Diese Entladung dauerte so lange, als der Akkumulator noch nutzbare Arbeit liefern konnte, und zwar waren dies 7,35 Stunden. Mithin war die abgegebene Energie:

$$7{,}35 \times 1{,}88 \times 6{,}5 = 89{,}8 \text{ Wattstunden.}$$

Das Verhältnis beider, nämlich hier

$$\frac{89{,}8}{109{,}2} = 0{,}822,$$

gibt den Nutzeffekt des Akkumulators, der also hier 82,2 Proz. beträgt.

Die vielfachen Anstrengungen, die Akkumulatoren zu verbessern, ihren Nutzeffekt und ihre Haltbarkeit zu erhöhen, haben allmählich zu dem Resultat geführt, daß man leicht und sicher 80 bis 85 Proz. der eingeführten Arbeit von den Akkumulatoren wieder erhält.

Dabei beruhen die verschiedenen Anordnungen, die man dem Akkumulator gegeben hat, im wesentlichen auf dem Verfahren von Planté und auf dem von Faure, die man zweckmäßig kombiniert.

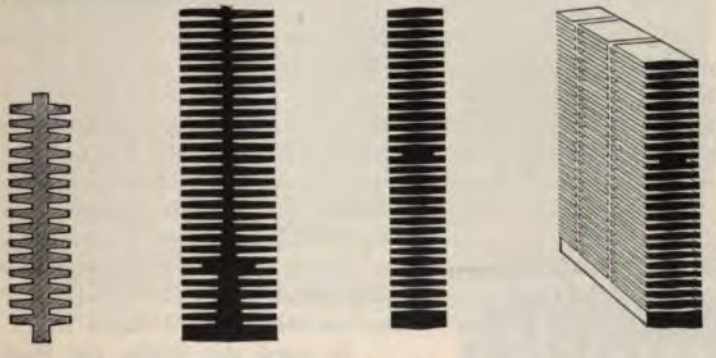
Die Fauresche Präparation mit Mennige zeigte den Übelstand, daß die Mennige leicht von den Bleiplatten abfiel. Dieses lernte man allmählich dadurch vermeiden, daß man die Platten gitterförmig machte.

Am meisten verbreitet sind in Deutschland die Hagener Akkumulatoren, welche von der Akkumulatorenfabrik in Hagen i. W. fabriziert werden und welche sich durch großen Nutzeffekt und sehr große Haltbarkeit auszeichnen. Die Bleiplatten dieser Elemente sind im wesentlichen nach dem Verfahren von Planté formiert.

Die Fabrikation derselben hat sich in den letzten Jahren geändert. Die positiven Bleiplatten wurden zuerst mit horizontalen, sehr tiefen Nuten versehen, von denen Fig. 379 den Querschnitt, also die Tiefe der Rippen zeigt. Diese Bleiplatten, die durch Gießen hergestellt werden, wurden nun durch fortwährende Ladung, Entladung, Ladung im entgegengesetzten Sinne, Entladung u. s. w. formiert, so daß sich die positiven Platten mit einer $^1/_2$ mm starken Bleisuperoxydschicht bedeckten, die ungemein fest an dem Bleikern haftete. Auf diese so formierte Schicht wurde nun, in die Rippen der Platten, Mennige eingetragen und diese wurde noch eine Zeitlang durch den Strom in Bleisuperoxyd verwandelt, welches dann ebenfalls ganz fest an den Platten haftet.

Man konnte aber dabei die Rippen nicht zu tief machen, weil sonst die Säure nicht genügend an die Mennige gelangen konnte. Da es aber von erheblichem Vorteil ist, die wirksame Oberfläche einer Platte möglichst groß zu machen, so wurde die Präparation mit Mennige ganz aufgegeben, und es werden die Platten jetzt ganz nach dem Plantéschen Verfahren formiert, ohne daß Mennige in die Rippen eingetragen wird.

Fig. 379. Fig. 380. Fig. 381. Fig. 382.



Dadurch konnte man nun die wirksame Oberfläche bedeutend vergrößern, indem man den inneren Bleikern nicht mehr durch die ganze Breite der Platte hindurchgehen ließ. Fig. 380 zeigt den Querschnitt einer Plattenart, der E-Platte, bei der der Kern schon sehr reduziert ist, während Fig. 381 die jetzt benutzte H-Platte im Querschnitt zeigt. Diese Platte hat keinen durch die ganze Breite der Platte gehenden Kern mehr. Fig. 382 zeigt eine solche Platte im Abschnitt. Die wirksame Oberfläche ist bei dieser sechsmal so groß, als die Oberfläche der massiven Platte wäre.

Die negativen Platten sind gitterförmig ausgearbeitet und in die Maschen wird Bleiglätte gefüllt, welche bei der Ladung vollständig in Bleischwamm umgewandelt wird.

Die Bleiplatten werden gleich in der Form gegossen, daß sie rechts und links je eine vorspringende Nase haben, mit denen sie dann in die Gefäße eingehängt werden. Fig. 383 gibt die Ansicht einer fertigen positiven, Fig. 384 die einer negativen Platte.

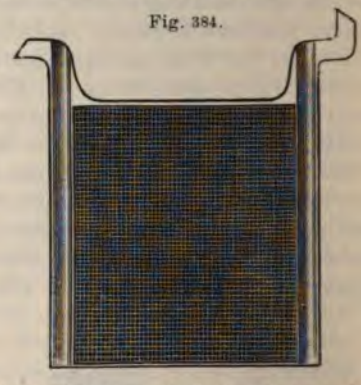
Eine Zahl formierter positiver und eine Zahl negativer Platten, je

miteinander verlötet, werden nun in ein Gefäß aus Holz oder Glas gebracht, das mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist. Dabei wird immer von den negativen Platten eine mehr genommen, so daß jede positive Platte zwischen zwei negativen hängt.

Fig. 385 zeigt einen solchen Akkumulator in einem Glasgefäß. Die Platten (hier 3 positive und 4 negative) sitzen alle mit den Nasen auf dem

Fig. 383.

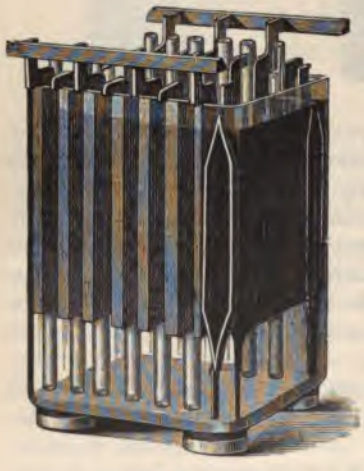
Fig. 384.



Rand des Gefäßes auf. Je zwei benachbarte Platten sind durch zwischengeschobene Glasröhren an der Berührung gehindert und voneinander isoliert.

Jede Zelle selbst wird auf Glasfüße, die mit einer Kautschukscheibe bedeckt sind, gestellt. Die Bleileiste der negativen Platten der einen Zelle ist so lang, daß sie, wie Fig. 386 zeigt, gleichzeitig die positiven Platten der nächsten Zelle aufnimmt. Die Verbindung der Platten geschieht nur durch Löten. Vielplattige Akkumulatoren werden in Holzgefäßen montiert, die mit Blei ausgeschlagen sind.

Fig. 385.

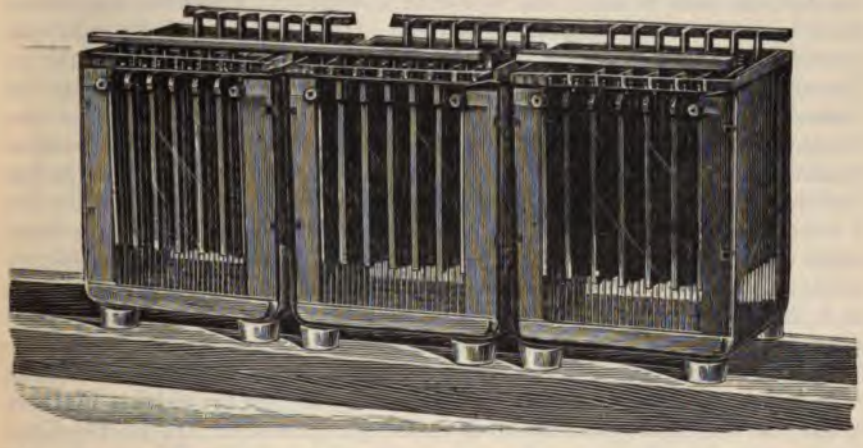


Je nach der Größe der Platten ist für jeden Akkumulator eine bestimmte maximale Stromstärke beim Laden und Entladen vorgeschrieben. Wird ein solcher Akkumulator mit der vorgeschriebenen Stromstärke geladen, so erhält er wenige Minuten nach Beginn der Ladung eine Spannung von 2,09 Volt. Diese Spannung bleibt ungefähr 6 Stunden lang während der Ladung dieselbe, um dann während der nächsten 4 Stunden langsam auf 2,34 Volt zu steigen. (Diese Änderung rührt natürlich von den Veränderungen der Säure her.) Wenn dieser Wert der Spannung erreicht ist, muß die Ladung aufhören, da weitere Ladung nutzlose Gasentwickelung hervorbringt. Wird dann die Entladung vorgenommen, so ist die Anfangsspannung bei der Entladung 1,95 Volt. Daß dieser Wert so viel kleiner ist als der bei der Ladung erreichte, kommt daher, daß

die Elektroden sich bei der Ladung mit Schichten von Wasserstoff resp. Sauerstoff überziehen, woher der große Wert der Spannung beim Laden rührt. Im ersten Moment der Entladung werden diese Schichten neutralisiert und es tritt die kleinere Spannung in Wirksamkeit. Bei normalem Entladungsstrom bleibt die Spannung lange Zeit auf 1,95 Volt und sinkt dann allmählich in 6 bis 7 Stunden von 1,95 Volt auf den Wert 1,80 Volt herab. Wenn dieser Wert erreicht ist, muß man die Entladung abbrechen und die Akkumulatoren frisch laden.

Die Akkumulatoren halten am besten, wenn sie mit der vorgeschriebenen Stromstärke geladen und entladen werden. Aber es schadet ihnen auch nicht sehr, wenn man sie mit höherer Stromstärke entladet. Nur darf man darin nicht zu weit gehen. Ein Kurzschluß, d. h. eine Entladung mit sehr großer Stromstärke, ruiniert die Platten. Bei den kleinsten fabrizierten Akkumulatoren beträgt die maximale Stromstärke bei der

Fig. 386.



Ladung und Entladung 6 Ampere. Bei den größten hat der Ladungsstrom 6253 Ampere, der Entladungsstrom sogar 10212 Ampere. Das Gewicht der kleinsten Akkumulatoren beträgt 13, das der größten 4100 Kilogramm. Dabei ist die Entladezeit für die kleinste Zelle 3 Stunden, für die größte 1 Stunde, so daß die Kapazität der ersten 18, der letzten 10212 Amperestunden beträgt. Da die Spannung eines Akkumulators 2 Volt beträgt, so ist die aufgespeicherte Energie in der ersten 36, in der zweiten 20424 Wattstunden. Nun sind 736 Watt gleich 1 Pferdekraft, also 736 Wattstunden gleich 1 Pferdestunde und daher ist die aufgespeicherte Arbeit in der ersten gleich 0,05, in der zweiten gleich 28 Pferdestunden. Die letztere Zelle enthält also die Arbeit in sich und kann sie wieder abgeben, welche 28 Pferde während 1 Stunde, oder 14 während 2 Stunden u. s. w. leisten. Pro Kilogramm Gewicht der Zelle sind in der kleinsten Zelle 2,7, in der größten 5 Wattstunden aufgespeichert. Das ist eine verhältnismäßig sehr geringe Arbeitsansammlung pro Kilogramm Gewicht. In der Tat gelten auch die oben angeführten Zahlen für Akkumulatoren, welche feststehen, sogenannte stationäre Akkumulatoren, bei denen es

auf die Größe des Gewichtes nicht sehr ankommt. Da jedoch in den letzten Jahren das Bedürfnis nach fahrbaren und tragbaren Akkumulatoren immer größer wurde, so bemühen sich die verschiedenen Fabriken, das Gewicht derselben bei gleicher Kapazität möglichst zu reduzieren.

Der Nutzeffekt dieser Akkumulatoren, d. h. das Verhältnis der bei der Entladung erhaltenen Wattstunden zu den bei der Ladung hineingegebenen, ist zirka 82 bis 85 Proz., wenn Ladung und Entladung normal waren. Bei stärkerer Beanspruchung des Akkumulators, wenn man etwa den Akkumulator durch einen geringen Widerstand schließt, so daß die Stromstärke bei der Entladung viel größer ist als die normale, ist natürlich der Nutzeffekt geringer. Aber bei folgenden Ladungen und Entladungen ist der Akkumulator trotzdem wieder nahezu normal, falls man nicht die Entladung zu rasch, d. h. mit zu großer Stromstärke vorgenommen hat. Auch in dieser Hinsicht hat man in den letzten Jahren die Akkumulatoren zu verbessern gesucht, indem man die Stromstärken, mit denen ein Akkumulator geladen oder entladen werden soll, möglichst vergrößert hat. Je rascher ein Akkumulator geladen oder entladen wird, desto kleiner ist seine Kapazität. Da die Akkumulatoren jetzt manchmal zum Betrieb von Trambahnen und Automobilen dienen, und ihre weitere Verwendung für diese Zwecke sehr erwünscht ist, so ist neben der Verringerung ihres Gewichtes eine Hauptforderung die, daß sie möglichst schnell geladen werden können, wenn sie entladen sind. Während man früher 3 bis 6 Stunden Ladungszeit für einen Akkumulator rechnete, ist man jetzt auf $^1/_2$ bis 1 Stunde heruntergegangen, d. h. man darf mit viel stärkeren Strömen laden, als es früher erlaubt war, ohne daß der Akkumulator geschädigt wird. Ebenso ist auch der erlaubte Entladungsstrom stärker als früher, d. h. man kann dem Akkumulator, ohne ihn zu ruinieren, in kurzer Zeit sehr viel größere elektrische Energie entnehmen, was beim Betrieb von Trambahnen und Automobilen von erheblichem Wert ist. Diese Verbesserung haben die Akkumulatoren dadurch erfahren, daß bei gleicher Plattengröße die wirksame Oberfläche, d. h. die gesamte dem Angriff der Gase ausgesetzte Oberfläche des körnigen und schwammigen Superoxyds bedeutend größer gemacht wurde.

Andere brauchbare Akkumulatoren als solche mit Bleiplatten hat man sich vielfach zu konstruieren bemüht. Einen Erfolg scheint darin bis jetzt nur Edison gehabt zu haben, der einen auf ganz anderen chemischen Vorgängen basierenden Akkumulator erfunden hat, und obwohl die praktische Brauchbarkeit desselben noch nicht vollkommen bewährt ist, so hat doch der Name Edisons einen solchen Klang, daß vielleicht vermutet werden kann, es werde ihm auch in dieser Beziehung ein großer Fortschritt zu verdanken sein.

Der Edisonakkumulator ist eine Nickeleisenzelle, mit Kalilauge als Flüssigkeit. Er besteht aus dünnen Platten aus Stahlblech, welche nur als Träger der wirksamen Massen dienen. In diese Platten sind rechteckige Löcher, Fenster, eingeschnitten, welche von Kästchen aus sehr dünnem Stahl mit den wirksamen Massen ausgefüllt werden, und zwar werden diese Massen in Form von Briketts in die Kästchen gelegt und das Ganze, Blech mit Kästchen und Briketts unter hohem Druck zusammengepreßt. Die Briketts auf der einen Platte bestehen aus einer

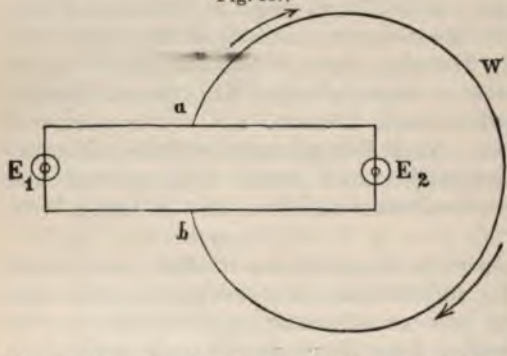
sehr fein gepulverten Eisenverbindung (es wird nicht mitgeteilt, welche das ist), die der anderen Platte aus einer fein gepulverten Nickelverbindung. Beide Briketts enthalten noch Graphit beigemengt, um die Leistungsfähigkeit des Ganzen zu erhöhen, was allerdings eine ziemlich zweifelhafte Angabe ist. Wenn nun ein Strom durch die Flüssigkeit gesendet wird, so zerlegt dieser zwei Moleküle Kalilauge (KOH) und es tritt an der Nickelelektrode Sauerstoff auf, welcher die Nickelverbindung in Nickelsuperoxyd verwandelt, während an der Eisenelektrode die dortige Eisenverbindung reduziert wird; zugleich bilden sich die zwei Moleküle Kalilauge wieder, indem an der einen Elektrode ein Wassermolekül zersetzt, an der anderen gebildet wird. Das Resultat ist also, daß die Flüssigkeit sich gar nicht ändert, sondern daß nur dem Eisen ein Sauerstoffatom weggenommen und dieses dem Nickel zugeführt ist. Ist die Zelle nun geladen und verbindet man jetzt die Elektroden, so fließt der Entladungsstrom, der umgekehrt das Nickel wieder reduziert, das Eisen oxydiert. Da die Flüssigkeit nicht verändert wird, sondern nur als Träger dient, so kann ihre Menge sehr gering genommen werden. Die elektromotorische Kraft einer Zelle bei der Entladung ist 1,1 Volt. Trotzdem diese bedeutend kleiner ist als bei Bleielektroden, soll man doch in einer Zelle pro Kilogramm Gesamtgewicht 30,85 Wattstunden aufspeichern können, also zirka sechsmal so viel wie bei Bleiakkumulatoren. Nach Europa sind die Edisonakkumulatoren wenigstens für große Leistungen noch immer nicht gelangt und es ist über ihre wirkliche praktische Brauchbarkeit noch das letzte Wort nicht zu sprechen.

Wenn wir von diesen speziellen Konstruktionen uns nun wieder zu allgemeinen Eigenschaften der Akkumulatoren wenden, so ist zunächst die Kapazität einer einzelnen Zelle um so größer, je größer ihre Platten sind und je mehr miteinander verbundene, also nebeneinander geschaltete Platten sie enthält. Sind mehrere gleiche Zellen zu einer Batterie hintereinander geschaltet, wie in der obigen Fig. 386, so ist die Kapazität der Batterie (in Amperestunden) doch bloß gleich der Kapazität einer einzigen Zelle. Durch die Hintereinanderschaltung wird nur die Spannung der Batterie, also die Spannung des Stromes vergrößert, aber nicht die Kapazität im ganzen. Fließt nämlich z. B. bei einer Batterie von 10 hintereinander geschalteten Akkumulatoren ein Strom von 8 Ampere durch den äußeren Schließungskreis, so fließt derselbe Strom auch in jeder Zelle, und in jeder Zelle wird pro Sekunde die gleiche Menge Bleisuperoxyd durch den auftretenden Wasserstoff reduziert. Hat also jede Zelle z. B. die Kapazität von 40 Amperestunden, so ist nach 5 Stunden die ganze Batterie erschöpft, da jede einzelne Zelle erschöpft ist. Der Strom von 8 Ampere hat aber hier die Spannung von 20 Volt ungefähr, während er bei einer einzigen Zelle nur die Spannung von 2 Volt hätte. Die Batterie hat also $20 \times 40 = 800$ Wattstunden Effekt, während jede einzelne Zelle 80 Wattstunden aufgespeichert enthält.

Zur Ladung von Akkumulatoren kann man natürlich Gleichstrommaschinen aller Art nehmen. Aber am zweckmäßigsten wendet man dazu Nebenschlußdynamos an. Da nämlich der Akkumulatorenstrom dem Maschinenstrom bei der Ladung entgegenfließt, so wird der Akkumulator nur dadurch geladen, daß die Dynamomaschine

eine höhere elektromotorische Kraft hat als der Akkumulator. Wenn aus irgend einem Grunde, z. B. durch Nachlassen der Geschwindigkeit des Gasmotors, durch Gleiten eines Riemens u. s. w., die Geschwindigkeit der Dynamomaschine sich verringert, also auch ihre elektromotorische Kraft abnimmt, so kann es vorkommen, daß momentan der Akkumulatorenstrom überwiegt. Dann werden aber bei Hauptstrommaschinen und bei Compoundmaschinen sofort die Magnete der Maschine ummagnetisiert und diese bleiben dann ummagnetisiert, auch wenn sich die Geschwindigkeit der Dynamomaschine wieder erhöht. Der Strom fließt dann also in umgekehrter Richtung durch den Akkumulator, und statt ihn zu laden, entladet er ihn. Bei Nebenschlußmaschinen aber kann das nicht stattfinden, denn dabei bleibt der Strom um die Elektromagnete immer unverändert in seiner Richtung, mag nun der Maschinen- oder der Akkumulatorenstrom zeitweise überwiegen. Betrachten wir, um das einzusehen, das Schema in Fig. 387, in welchem bei E_1 und E_2 zwei verschieden starke elektromotorische Kräfte wirken. Bei a und b zweige sich ein Widerstand w ab. (E_1 ist der Akkumulator, E_2 der Anker der Dynamomaschine, w die Magnetbewickelung der Maschine.) Ist nun E_2 stärker als E_1 und fließt der positive Strom von E_2 über a nach E_1, so hat a positive Spannung, b negative. In w fließt also der Strom in Richtung des Pfeiles. Ist umgekehrt E_1 stärker als E_2, so fließt zwischen E_1 und E_2 der Strom in entgegengesetzter Richtung, von E_1 über a nach E_2. Folglich hat auch dann wieder a positive Spannung, b negative und folglich fließt der Strom in w wiederum in Richtung des Pfeiles wie früher. Dieses Schema läßt sich ohne weiteres auf die Verbindung einer Nebenschlußdynamomaschine mit einem Akkumulator übertragen. Welche elektromotorische Kraft auch überwiege, die der Maschine oder die des Akkumulators, stets fließt im Draht w, d. h. hier um die Magnete, der Strom in derselben Richtung. Der Strom der Maschine kehrt sich mithin nicht dauernd um, wenn er auch zuweilen durch Geschwindigkeitsschwankungen sich momentan umkehren kann.

Fig. 387.

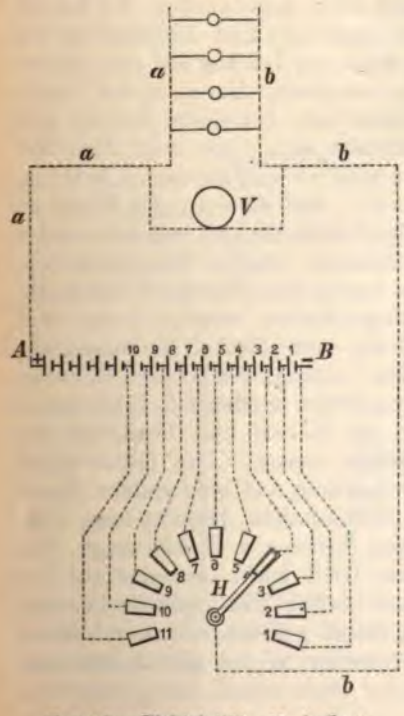


Bei jeder Anlage von Akkumulatoren muß nun zunächst eine Schaltung eingerichtet werden, welche es ermöglicht, einerseits die Akkumulatoren mit einer Dynamomaschine so in Verbindung zu bringen, daß die ersteren geladen werden, und andererseits die Akkumulatorenbatterie mit denjenigen Apparaten (Glühlampen, Bogenlampen oder Elektromotoren etc.) zu verbinden, in welche sie den Strom abgeben soll. Und zwar sollen diese Verbindungen einfach durch bloße Umdrehung eines Hebels oder Umschaltung eines Stöpsels ausgeführt werden können. Ferner muß sowohl für die Ladung als für die Entladung ein Amperemeter vorhanden sein, und ein Spannungsmesser (Voltmeter), welche beiden Apparate

stets anzeigen, ob der Akkumulator in Ordnung ist. Zur Regulierung der Stromstärke braucht man ferner noch einen Regulierwiderstand, der für die im allgemeinen starken Ströme eingerichtet sein muß. Und endlich, wenn es sich bei großen Anlagen darum handelt, die Spannung an den Enden der Akkumulatorenbatterie dauernd konstant zu halten, obwohl die Spannung jeder einzelnen Zelle allmählich abnimmt, gehört noch ein sogenannter Zellenschalter dazu, welcher neue Zellen ein- und ausschaltet. Wenn nämlich z. B. 60 Akkumulatoren vorhanden sind und die Spannung, welche für die Lampen etc. gebraucht wird, 110 Volt betragen soll, so werden im Anfang, wo jede Zelle 1,95 Volt Spannung hat, nur 56 Zellen einzuschalten sein, wenn aber dann die Spannung jeder Zelle auf 1,80 Volt abgenommen hat, so werden 60 Zellen einzuschalten sein. Diese Zuschaltung wird durch den Zellenschalter entweder mit der Hand oder automatisch besorgt.

Fig. 388.

Fig. 389.

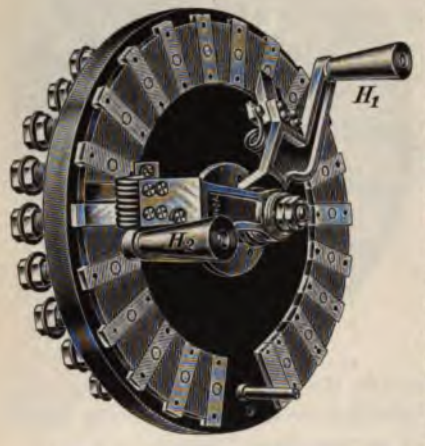


Die Zellenschalter bestehen, äußerlich angesehen, wie Fig. 388 (Zellenschalter von Dr. Paul Meyer, A.G., Berlin) zeigt, aus einer Reihe von Kontaktstücken k k, welche gewöhnlich im Kreise auf einer Schieferplatte angebracht sind und auf welchen ein Kontakthebel verschoben werden kann. Jede von den abzuschaltenden oder zuzuschaltenden Zellen steht durch einen Draht mit einem der Kontaktstücke in Verbindung. Die Kontaktstücke sind voneinander durch isolierende Glasstücke g g getrennt. Wie der Zellenschalter wirkt, das geht am besten aus der Fig. 389 hervor, in welcher eine Akkumulatorenbatterie A B gezeichnet ist, von der die letzten 10 Zellen durch je einen Draht mit den Kontaktstücken des Zellenschalters verbunden sind. Der eine Hauptleitungsdraht a in die äußere Leitung (Lampen in der Figur) geht vom Anfang A (+ Pol) der Batterie aus, der andere b von dem Kontakthebel H des Zellenschalters. Bei der in der

Figur gezeichneten Stellung sieht man nun, daß alle Zellen von A an bis zur Zelle 4 den Strom in die Leitung senden, während die Zellen 1, 2, 3 abgeschaltet sind. V ist ein Voltmeter.

Will man eine Akkumulatorenbatterie laden, während man zugleich von ihr Strom (etwa für Glühlampen) abnimmt, so muß man zwei Zellenschalter anwenden, deren erster die eben erörterte Funktion hat, die Spannung für die Lichtleitung konstant zu erhalten, während der andere diejenigen Zellen, welche für die Lichtleitung nicht gebraucht und daher rascher geladen werden, ganz ausschaltet, wenn sie vollkommen geladen sind. Die beiden Zellenschalter sind gewöhnlich in einem Apparat mit zwei Hebeln vereinigt und heißen dann Doppelzellenschalter. Fig. 390 zeigt einen elegant ausgeführten Doppelzellenschalter der A.G. Dr. Paul Meyer. Man sieht die beiden Hebel H_1 und H_2, die übereinander auf den Kontaktplatten verschoben werden können.

Fig. 390.



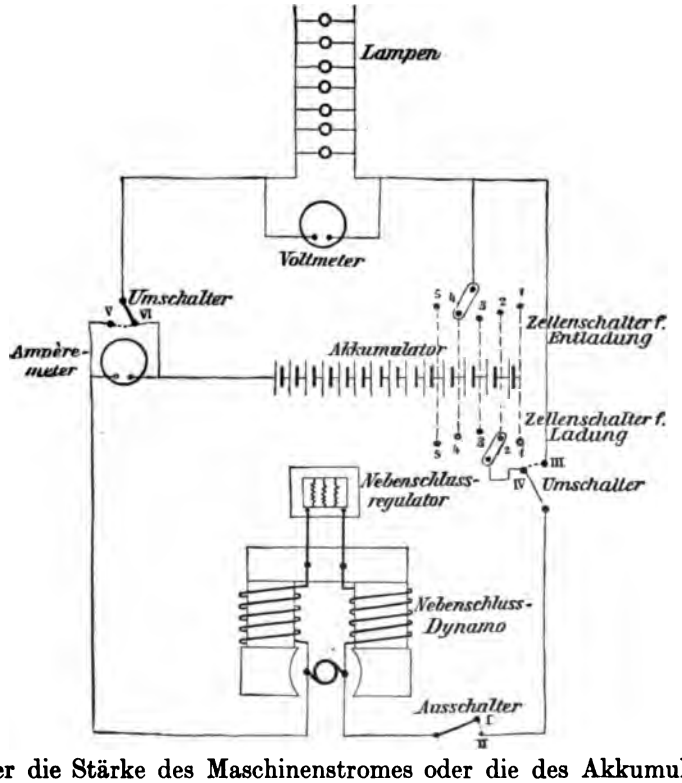
Die notwendigen Apparate zur Messung und zur Ein- und Ausschaltung des Stromes werden gewöhnlich auf einer sogenannten Schalttafel angebracht. Die Vorrichtungen zum Ein- und Ausschalten des Stromes oder zum Umschalten desselben von einer Leitung auf eine andere müssen natürlich für die starken Ströme, mit denen man es in der Praxis gewöhnlich zu tun hat, besonders kräftig und sorgfältig konstruiert sein. So zeigt Fig. 391 einen Hebelausschalter der A.E.G. im geöffneten Zustand. Auf dem an der Wand zu befestigenden Brett befinden sich eng aneinander stehend zwei federnde starke Messingbacken, zwischen welche das an dem Handgriff befestigte Messingstück eingeschoben werden kann und durch Federwirkung sehr plötzlich herausgedreht werden kann. Die Leitung, welche nach Belieben geschlossen oder geöffnet werden soll, führt unten zu der Klemme des Hebels und oben von der Klemme der Backen weiter. Um ferner einen Strom von einer Leitung auf eine andere durch eine Bewegung umzuschalten, benutzt man Umschalter, von denen Fig. 392 einen von Siemens & Halske zeigt. Ein glattes federndes Messingstück mit einem Griff kann entweder auf den rechten oder linken Kontakt, der aus einer breiten Messingfläche besteht, gedreht werden. Der Strom wird zum Hebel geführt und von diesem durch das eine oder andere Messingstück weiter in die mit diesen verbundenen Leitungen.

Fig. 391.

Die Schaltung einer Dynamomaschine, einer Akkumulatorenbatterie und einer Anzahl von Glühlampen, die sowohl von der Dynamomaschine, wie von den Akkumulatoren mit Strom versehen werden sollen, und zwar auch während der Ladung der Akkumulatoren, zeigt danach Fig. 393. Die Akkumulatorenbatterie und die Glühlampen werden parallel geschaltet. Von der Dynamomaschine aus gehen rechts und links je eine Leitung aus. Zwischen diese ist die Akkumulatorenbatterie (gewöhnlich mit einem Stromrichtungszeiger, einem einfachen Galvanoskop) eingeschaltet und oben in der Figur sind zwischen sie die Glühlampen alle parallel geschaltet und auch das Voltmeter liegt parallel zu ihnen. Der Umschalter rechts (bezeichnet mit III, IV) dient dazu, entweder den Akkumulatorenstrom allein direkt in die Lampen zu senden oder, wenn er so steht, wie in der Figur, den Maschinenstrom in den Akkumulator zu senden, diesen also zu laden, und zugleich auch den Maschinenstrom in die Lampen zu senden. Das Amperemeter links kann durch einen Umschalter V, VI

Fig. 392.

Fig. 393.



entweder die Stärke des Maschinenstromes oder die des Akkumulatorenstromes anzeigen. Wir wollen die einzelnen Schaltungen bei dieser Anordnung der Reihe nach betrachten.

Erster Fall. Der Ausschalter unten steht auf I. Dann ist die Dynamomaschine ganz aus dem Stromkreis ausgeschaltet und es ist nur eine Verbindung zwischen den Akkumulatoren und den Lampen vorhanden. Der Entladezellenschalter steht auf 4, mithin sind die letzten 3 Zellen ausgeschaltet und der Strom geht vom Akkumulator durch die Zelle 4 in die Lampen, von den Lampen (bei Stellung VI des Umschalters links) in den Akkumulator zurück. Stellt man den Umschalter links auf V, so geht der Strom noch durch das Amperemeter, man kann also die Stärke des Entladungsstromes messen. Das Voltmeter, das im Nebenschluß liegt, mißt die Spannung und gibt an, wie viel Zellen man durch den oberen Zellenschalter zuschalten oder abschalten muß, damit die Spannung den vorgeschriebenen Wert (etwa 100 Volt) hat.

Zweiter Fall. Der Ausschalter unten steht auf II, aber der Umschalter rechts steht auf III. Dann ist der Akkumulator ganz ausgeschaltet (falls der Kontakthebel des Entladezellenschalters auf eine Isolierung gestellt ist) und der Maschinenstrom geht direkt in die Lampen. Man kann seine Stärke messen, wenn man den Umschalter links auf V stellt.

Dritter Fall. Der Ausschalter unten steht auf II, der Umschalter rechts auf IV. Dann geht der Maschinenstrom sowohl durch den Akkumulator wie auch durch die Lampen, und zugleich geht der Akkumulatorenstrom durch die Lampen. Und zwar ladet der Maschinenstrom alle Zellen mit Ausnahme von 1, welche abgeschaltet ist, und die Lampen werden von allen Akkumulatoren außer 1, 2, 3 gespeist. Das Amperemeter mißt den Strom, der durch den Akkumulator geht.

Die Akkumulatoren spielen eine höchst bedeutende Rolle in den elektrischen Zentralstationen, die Gleichstrom liefern. Diese müssen nämlich im stande sein, täglich den Maximalbedarf an Elektrizität für die Beleuchtung in einer Stadt zu befriedigen. Dieser Maximalbedarf findet aber im wesentlichen nur in der kurzen Zeit vom Dunkelwerden bis gegen 10 Uhr abends statt, nur in dieser Zeit werden die Maschinen voll ausgenutzt. Durch Einschalten einer Akkumulatorenbatterie kann man daher die Maschinen sehr viel kleiner wählen. Man läßt sie am Tage, wenn wenig Lichtbedarf ist, die Akkumulatoren laden und abends unterstützen dann die Akkumulatoren die Maschine zur Befriedigung des Maximalbedarfs. Gerade in Zentralstationen sind die Akkumulatoren am meisten angewendet.

Aber auch bei Einzelanlagen ist gewöhnlich die Einrichtung einer Akkumulatorenbatterie deswegen von großem Vorteil, weil diese bei der Entladung, also wenn sie Strom abgibt, unbeaufsichtigt arbeiten kann. Es ist daher auch z. B. bei der Einrichtung von elektrischer Beleuchtung in Privathäusern oder Geschäften, wenn diese aus einer eigenen Dynamomaschine sich den Strom erzeugen, ratsam, eine Akkumulatorenbatterie von passender Größe einzuführen. Sonst müßte z. B. die Dynamomaschine auch in der Nacht fortlaufend im Betrieb sein, wenn man auch nur eine einzige Lampe in der Nacht anzünden will, während die Akkumulatorenbatterie ohne Bedienung Tag und Nacht betriebsbereit ist, sobald sie geladen ist.

Allgemein dient in den meisten Betrieben, in denen überhaupt Elektrizität benutzt wird, eine Akkumulatorenbatterie als ein Reservoir,

welches die Elektrizität aufnimmt und zu beliebiger Zeit wieder abgibt. Die Dampfmaschinen, die in den meisten Fabriken eine vielfach wechselnde Belastung haben, arbeiten bei Vorhandensein einer Akkumulatorenbatterie gleichmäßiger und daher ökonomischer, weil sie eben bei geringerer Belastung sofort die Batterie laden und diese Arbeit dadurch zum Aufspeichern bringen können.

Die Bleiakkumulatoren leiden trotz ihrer jetzigen Vervollkommnung und ihrer großen Verwendbarkeit an einigen Übelständen. Diese sind ihr, trotz erheblicher Ermäßigungen gegen früher, immer noch hoher Preis, ihr großes Gewicht und ihre empfindliche Behandlung. Wenn auch der erste Übelstand nicht von großer Bedeutung ist, da eben trotz des Preises die Anschaffung von Akkumulatoren häufig von wirtschaftlichem Vorteil ist, so sind es die beiden letzten Übelstände in manchen Fällen um so mehr. Das hohe Gewicht der Akkumulatoren und der verhältnismäßig große Raum, den sie einnehmen, zwingt dazu, sie namentlich in feststehenden Anlagen zu gebrauchen. Trambahnwagen oder Automobile mit Akkumulatoren zu belasten, hat sich trotz der Vervollkommnung, welche die Akkumulatoren für diese Zwecke erfahren haben, bisher noch nicht als so zweckmäßig bewiesen, daß man anders als in Notfällen oder da, wo es auf Kosten nicht ankommt, dieses System akzeptiert. Und die Empfindlichkeit der Akkumulatoren wirkt in derselben Richtung. Man darf von Akkumulatoren, will man sie lange lebensfähig erhalten, nicht einen viel stärkeren Strom entnehmen, als er der Größe ihrer Platten angemessen ist. Zu starke Ströme, auch wenn sie nur kurze Zeit entnommen werden, lösen die wirksame Schicht auf den Platten leicht ab und ruinieren daher die Elektroden. Daher muß man von vornherein die Größe der Akkumulatoren, also auch ihr Gewicht, so wählen, daß sie den Maximalstrom, auch wenn er nur kurze Zeit aus ihnen entnommen wird, ohne Schädigung liefern. Gerade im Trambahnbetrieb ist aber oft die Notwendigkeit vorhanden, zeitweise einen viel stärkeren Strom zu gebrauchen, als im normalen Zustand. Solange ein Trambahnwagen voll besetzt auf gerader Bahn ohne Steigungen läuft, so lange braucht er, wenn man ihn elektrisch betreibt, seinen normalen Strom, nach dem sich also auch die Größe des mitzuführenden Akkumulators richten muß. Sobald aber der Wagen Kurven zu durchfahren hat, braucht er schon mehr als die normale Arbeit. Hat er Steigungen zu durchlaufen, so wird die nötige Arbeit stark in die Höhe gesetzt und ebenso ist auch die Zugkraft, die der Motor ausüben muß, beim Angehen des Wagens von der Ruhe aus eine bedeutend größere als in der normalen Fahrt. Also ist beim Trambahnbetrieb ein Akkumulator notwendig, der ohne Schädigung gestattet, einen viel stärkeren Strom als den normalen, etwa den 2-, 4-, ja bis 10fachen, zeitweise zu entnehmen. Dies halten nun die Bleiakkumulatoren gewöhnlich nicht aus und daher rühren die Mißerfolge bei den mit ihnen betriebenen Trambahnen, die aber allmählich, da eifrig an der Verbesserung gearbeitet wird, vielleicht doch in Erfolge übergehen werden.

Man hat die Frage angeregt, ob es nicht möglich sei, mit Hilfe der Akkumulatoren auch unregelmäßig wirkende Naturkräfte nutzbar zu machen. Man dachte daran, die Kraft des Windes, die Kraft des niederfallenden Regens dazu zu benutzen, um stets, wenn die Kraft vorhanden

ist, durch Windmühlen und durch eigens dazu gebaute schief abfallende Dächer sie zur Bewegung von Dynamomaschinen anzuwenden. Durch die Dynamomaschine wollte man Akkumulatoren laden lassen und die in ihnen aufgespeicherte Arbeit zu beliebiger Zeit benutzen. Im Prinzip ist diese Idee, die einen Fortschritt in der Ausnutzung der Naturkräfte bieten würde, sicher möglich und ausführbar. Praktisch ausgeführt ist sie aber bisher nicht, weil bisher noch der in Zukunft zu erwartende Kohlenmangel nicht dazu nötigt.

4. Kapitel.

Die Transformatoren, Umformer und Gleichrichter.

So wie die Gleichstrommaschinen in den Akkumulatoren ein äußerst wertvolles und wichtiges Hilfsmittel für ihre praktische Benutzung besitzen, so besitzen die Wechselstrommaschinen ein ebensolches, aber in anderer Richtung wirkendes, in den Transformatoren. Könnte man für Gleichströme außer den Akkumulatoren auch noch brauchbare Transformatoren, oder könnte man umgekehrt für die Wechselströme außer den Transformatoren auch noch passende Akkumulatoren erfinden, so wäre jede von diesen beiden Stromarten zu idealer Vollkommenheit zu bringen. So aber hat jede dieser beiden Stromarten ihre besonderen Vorzüge, und daß die Wechselströme in vielen Fällen einen wesentlichen Vorsprung vor den Gleichströmen bekommen haben, das verdanken sie den Transformatoren.

Die Transformatoren haben nämlich die Aufgabe, elektrische Ströme von hoher Spannung und geringer Intensität in solche von geringer Spannung und hoher Intensität umzuwandeln und umgekehrt.

Ein jeder elektrische Strom besitzt ja, wie wir wissen, einen gewissen Effekt, er kann in jeder Sekunde eine gewisse Arbeit leisten. Die Arbeitsmenge, welche der Strom in jeder Sekunde abgeben kann, also der Effekt, welchen er enthält, wird gemessen durch das Produkt aus seiner elektromotorischen Kraft und seiner nutzbaren Intensität (S. 114 u. 255). Ist die erstere in Volt ausgedrückt, die zweite in Ampere, so ist der Effekt des Stromkreises in Volt-Ampere oder Watt ausgedrückt. Die Arbeit, welche der Strom in einer gewissen Zeit leisten kann, ist also das Produkt aus der Zahl seiner Watt und dieser Zeit.

Es können daher zwei Ströme ganz denselben Effekt besitzen, auch wenn sie ganz verschiedene Spannungen und ganz verschiedene Stromstärken haben, nämlich dann, wenn das Produkt aus Spannung (Volt) und Intensität (Ampere) in beiden Fällen dasselbe ist. Ein Strom, der 1000 Volt Spannung und $^1/_2$ Ampere Stärke hat, besitzt denselben Effekt wie ein anderer, der 2 Volt Spannung hat, aber 250 Ampere Stärke. Das Produkt ist beidemal 500 Watt.

Da man nun den Effekt eines Stromes durch Aufwendung äußerer Arbeit, etwa von einer Dampfmaschine, erzeugen muß, so sieht man daraus, daß es prinzipiell möglich ist, ohne Aufwendung von besonders zu leistender Arbeit, die Spannung eines Stromes auf Kosten seiner Intensität oder die Intensität eines Stromes auf Kosten seiner Spannung zu erhöhen. Es fragt sich nur erstens, ob und wie das ausgeführt werden kann, und zweitens, ob diese Umwandlung, diese Transformation, eine praktische Verwendbarkeit besitzt.

Um die zweite Frage, die Frage nach dem Nutzen, zunächst zu beantworten, so besteht dieser hauptsächlich darin, daß die Fortleitung der Elektrizität auf größere Entfernungen bei hochgespannten Strömen von geringer Intensität ganz wesentlich billiger ist als bei niedrig gespannten Strömen von großer Intensität, und daß man daher durch solche Transformationen von Strömen leichter, ja oft allein im standé ist, einen der Hauptvorzüge der Elektrizität auszunutzen, nämlich ihre Fortleitungsfähigkeit auf beliebig weite Entfernungen.

Wenn ein elektrischer Strom an einer Stelle A erzeugt wird, etwa durch eine Dynamomaschine, und an einer zweiten Stelle B, die weit von der ersten entfernt sein möge, gebraucht werden soll, etwa um Bogenlampen zu speisen, so müssen A und B je durch eine Leitung, und zwar im allgemeinen durch eine doppelte Leitung — eine für den Hingang und die andere für den Rückgang des Stromes — verbunden sein. Durch diese Leitung fließt der Strom; aber dabei muß er in der ganzen Leitung selbst Wärme entwickeln, und zwar nach dem Jouleschen Gesetz. Für diese gänzlich unbrauchbare, unproduktive Wärmeentwickelung verbraucht er fortdauernd Energie, welche natürlich von der Dampfmaschine, welche die Dynamomaschine treibt, geliefert werden muß. Diese Wärmemenge, die in jeder Sekunde in der Leitung erzeugt wird, ist gleich dem Widerstand der Leitung multipliziert mit dem Quadrat der Stromstärke. Man sieht daraus: je größer bei einer bestimmten Leitung die Stromstärke ist, die man benutzt, um so größer und zwar im quadratischen Verhältnis ist die nutzlos erzeugte Wärmemenge, ist also die nutzlos aufzuwendende Arbeit. Man kann und muß nun aber verlangen, daß diese in der Leitung verlorene Energie einen bestimmten Betrag, einen bestimmten Prozentsatz der ganzen Energie nicht übersteige. Man hat zwei Mittel, diese Forderung zu erfüllen. Das erste Mittel besteht darin, daß man den Widerstand der Leitung verringert. Da die Joulesche Wärme um so geringer ist, je geringer der Widerstand ist, so kann man — theoretisch — natürlich diese nutzlos verschwendete Energie auf jeden beliebig geringen Betrag herabdrücken, wenn man den Widerstand der Leitung verringert. Aber praktisch ist da bald eine Grenze vorhanden. Die Verringerung des Widerstandes der Leitung bei gleicher Länge kann nur dadurch geschehen, daß man den Querschnitt der Leitung vergrößert. Man muß also bei einer Kupferleitung je nach der Stromstärke dickere und dickere Kupferdrähte, Kupferstangen, nehmen, um den Verlust an Energie klein zu halten. Dadurch verteuert sich aber die Anlage ganz erheblich und es tritt bald der Punkt ein, wo man an dem für die Kupferleitung aufgewendeten Kapital ebensoviel an Zinsen verliert, als der Preis der Energie ist, welche durch geringeren Querschnitt des Kupfers verloren gehen würde. Dann hat natürlich wirtschaftlich diese Vergrößerung des Leitungsquerschnittes gar keine Bedeutung mehr. Diese Grenze tritt gewöhnlich schon bei einer Entfernung der beiden Stationen von 1000—1500 m ein.

Es bleibt ein zweites Mittel übrig, um den Energieverlust nicht über eine bestimmte Grenze gehen zu lassen, nämlich die Verringerung der Stromstärke. In der Tat, wenn man die Stromstärke kleiner machen kann, so läßt sich dadurch die Joulesche Wärme beliebig verringern.

Aber an der Ankunftsstelle braucht man ja eine bestimmte Stärke des Stromes, etwa zum Speisen von Bogenlampen, kann also, wie es scheint, mit der Stromstärke nicht beliebig heruntergehen. Hier ist nun der Punkt, an dem der Nutzen der Transformatoren eintritt. Man kann wohl die Stromstärke in der Leitung von A nach B beliebig klein machen, aber in der Ankunftsstation doch eine bedeutende Stromstärke erzeugen, wenn man den ankommenden Strom dort transformiert. Natürlicherweise kann man durch den Transformator nichts an Energie gewinnen, vielmehr muß der in B ankommende Strom mindestens so viel Effekt, so viele Watt besitzen, als man in B braucht. Da nun der ankommende Strom geringe Intensität haben soll, so heißt das, daß er große Spannung besitzen muß, denn das Produkt aus Intensität und Spannung gibt den Effekt.

Man erkennt aus diesen Betrachtungen leicht, daß man, um durch einen elektrischen Strom Energie auf weite Entfernungen übertragen zu können, ohne zu großen Verlusten ausgesetzt zu sein und ohne zu starke Leitungen anwenden zu müssen, daß man dem Strom hohe Spannung (hohe elektromotorische Kraft) und geringe Intensität geben muß. An der Verbrauchsstelle aber braucht man gewöhnlich große Intensität und verhältnismäßig geringe Spannung, und deshalb muß man einen so fortgeleiteten Strom transformieren, man muß ihn an der Verbrauchsstelle von hoher Spannung auf niedrige und von geringer Intensität auf hohe bringen.

Aber auch an der Erzeugungsstelle selbst wird der Strom manchmal nicht direkt in solchem Zustand erhalten, daß er sich zur weiten Fortleitung eignet. Er hat manchmal direkt eine zu geringe Spannung, weil man nicht leicht Maschinen mit sehr hohen Spannungen bauen kann. Dann muß man ihn erst, bevor er fortgeleitet wird, auf die passende hohe Spannung transformieren und am Ende der Leitung ihn dann wieder zurücktransformieren.

Diese Aufgabe nun, die Transformation der Energie eines elektrischen Stromes, ist für Wechselströme von selbst schon gelöst, wenn auch in unvollkommener Weise, in den Induktionsapparaten, wie sie seit Faraday konstruiert sind und wie wir sie auf S. 227 ff. beschrieben haben. Diese bestehen aus einer primären Drahtrolle und einer sekundären, von denen die eine, gewöhnlich die primäre, in der anderen steckt. In die Höhlung der inneren Drahtrolle wird ein Kern von weichem Eisen gebracht und zwar gebildet aus oxydierten Eisendrähten, um die Wirbelströme in ihm zu verhindern. Läßt man durch die primäre Rolle eines solchen Apparates Wechselströme hindurchgehen, die man außerhalb derselben irgendwie erzeugt, etwa durch eine Wechselstrommaschine, so erregt ja jeder Wechsel, jede Veränderung in der Intensität des primären Stromes Induktionsströme in der sekundären Rolle, und diese mit ihrer äußeren Leitung wird nun ebenfalls von Wechselströmen durchflossen. Der weiche Eisenkern verstärkt diese Induktionsströme; denn durch die Wechsel im primären Strom wird der Eisenkern selbst abwechselnd nach der einen und nach der anderen Richtung magnetisiert, und diese Veränderungen in seinem Magnetismus erzeugen ebenfalls in der sekundären Rolle die entsprechenden Induktionsstöße und verstärken die von den primären Stromschwankungen erzeugten.

Nun hängt die elektromotorische Kraft des sekundären Stromes, seine Spannung, wie wir auf S. 215 gesehen haben, von folgenden drei Größen ab. Zunächst von der Intensität des primären Stromes, dann von der Zahl der Windungen auf der sekundären Rolle, und drittens von der Geschwindigkeit der primären Stromänderungen, also von der Zahl der Stromwechsel pro Sekunde. Daraus folgt, daß man es bei jedem angegebenen primären Wechselstrom in der Hand hat, einfach durch die Zahl der Windungen in der sekundären Rolle dem sekundären Strom einen beliebigen Wert der Spannung zu geben. Man kann es leicht erreichen, daß der sekundäre Strom höhere Spannung hat als der primäre. Dann muß man die Zahl der sekundären Windungen größer machen als die Zahl der primären Windungen. Man kann es auch umgekehrt leicht erreichen, daß der sekundäre Strom geringere Spannung hat als der primäre. Dann muß man der sekundären Rolle wenig, der primären Rolle viel Windungen geben. Endlich kann man auch bewirken, daß der sekundäre Strom dieselbe Spannung hat wie der primäre; dann muß man, wenn die Windungen sonst symmetrisch angeordnet sind, der primären und der sekundären Rolle die gleiche Zahl von Windungen geben.

Es kommt also wesentlich auf das Verhältnis der Zahl der primären und der sekundären Windungen an. Man bezeichnet das Verhältnis

$$\frac{\text{Zahl der primären Windungen}}{\text{Zahl der sekundären Windungen}}$$

als den Transformationskoeffizienten des Transformators.

Ist dieser Koeffizient größer als 1, so sind mehr primäre als sekundäre Windungen vorhanden, folglich wird ein Strom von höherer Spannung in einen solchen von niederer Spannung heruntertransformiert.

Ist dieser Koeffizient kleiner als 1, so sind weniger primäre als sekundäre Windungen vorhanden, dann wird aus einem Strom von geringerer Spannung ein solcher von höherer Spannung erzeugt, die Spannung wird hinauftransformiert. Das ist der Fall bei den speziell so genannten Induktionsapparaten. Sie sind also Transformatoren mit einem Koeffizienten, der kleiner als 1 ist.

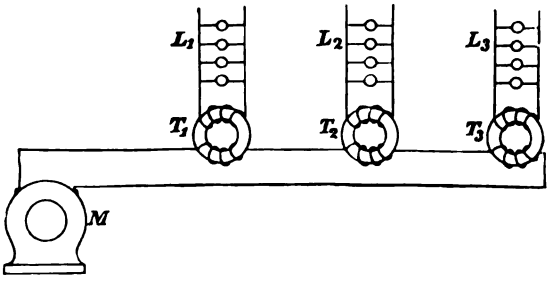
Endlich drittens, wenn dieser Koeffizient gleich 1 ist, dann haben der primäre und der sekundäre Strom gleiche Spannung. In diesem letzteren Fall findet also gar keine eigentliche Verwandlung von elektrischer Energie statt. Der primäre und der sekundäre Strom sind gleich gespannt.

Es scheint daher, daß diese letzteren Apparate eigentlich keine Vorteile bieten. Sie bieten sie aber in folgender Hinsicht. Wenn man einen Transformator, d. h. seine primäre Wickelung, in einen Stromkreis einschaltet, so kann man seine sekundäre Wickelung benutzen, um irgendwelche elektrische Arbeiten leisten zu lassen, also Glühlampen und Bogenlampen zu betreiben, Motoren in Bewegung zu setzen u. s. w. Ist in demselben primären Stromkreis noch ein zweiter und dritter Transformator u. s. f. vorhanden, so sind die sekundären Stromkreise aller dieser Transformatoren voneinander unabhängig. Was in dem sekundären Stromkreise des zweiten Transformators vor sich geht, beeinflußt den sekundären Stromkreis des ersten gar nicht, falls nur der Hauptstromkreis unverändert bleibt. Man hat also in den Transformatoren auch ein Mittel,

um aus einem primären Stromkreis eine Reihe voneinander unabhängiger sekundärer Stromkreise abzuzweigen. Jeder Transformator ist dann gewissermaßen eine eigene Dynamomaschine, die den sekundären Kreis speist. Gerade zu diesem Zweck wurden zuerst Transformatoren angewendet, und zwar solche mit dem Transformationskoeffizienten 1, welche man auch deshalb Sekundärgeneratoren nennt.

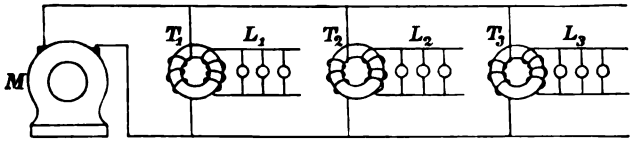
Eine derartige Anordnung der Transformatoren wird durch Fig. 394 dargestellt. Darin bedeuten die Ringe T_1, T_2, T_3 die Transformatoren. Jeder hat unten eine Wickelung, die primäre, und oben eine, die sekundäre. Von der Maschine M gehen die zwei Leitungen aus, und in diese sind die primären Wickelungen der drei Transformatoren hintereinander geschaltet. Von der sekundären Wickelung jedes Transformators gehen dann die eigentlichen Gebrauchsleitungen L_1, L_2, L_3 aus, in welche etwa Glühlampen oder Motoren eingeschaltet sind.

Fig. 394.



Die Absicht aber, eine billige Fortleitung des Stromes und zugleich eine Verteilung desselben auf verschiedene Verbrauchsstellen zu erzielen, wird bedeutend vorteilhafter erreicht, wenn man die Transformatoren (d. h. ihre primären Wickelungen) nicht hintereinander, sondern parallel schaltet, und wenn man, wie das auch sonst üblich ist, auch die Stromverbrauchsapparate (Lampen etc.) in dem sekundären Kreis jedes Transformators ebenfalls alle parallel schaltet. Das Schema für eine solche Schaltung ist in Fig. 395 gegeben, in welcher die Buchstaben dieselbe Bedeutung haben, wie in der vorigen Figur. Die weitere Ausführung und die praktischen Vorzüge dieser Schaltung werden aber erst in dem Kap. 9 dieses Teils auseinandergesetzt werden. Hier soll nur von der Konstruktion der Transformatoren selbst, nicht von ihrer Verbindung untereinander, die Rede sein.

Fig. 395.



Eine Hauptforderung, die man an jeden Transformator stellen muß, ist die, daß er die Umwandlung der elektrischen Energie ohne große Verluste bewirkt. Mit anderen Worten, die von den Klemmen der sekundären Wickelung in den äußeren Stromkreis abzugebende elektrische Energie soll nicht viel kleiner sein, wie die in die primäre Wickelung von deren Klemmen aus hineingeleitete Energie. Ganz gleich lassen sich diese Energieen allerdings nicht machen, ein Verlust an Energie muß notwendig eintreten. Zunächst tritt sowohl in der primären wie in der sekundären

Wickelung die Joulesche Wärme auf, welche auf Kosten der zugeführten Energie entsteht und welche für den Betrieb des Transformators nutzlos ist. Ferner entwickeln sich in dem Eisenkern des Transformators die Wirbelströme, welche ebenfalls Energie absorbieren. Und drittens muß ja bei den periodisch sich ändernden magnetisierenden Kräften die Koerzitivkraft des Eisens (S. 166) bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung überwunden werden. Auch dazu ist ein Teil der primären Energie notwendig. Diese Energieverluste durch die periodische Magnetisierung des Eisens bezeichnet man, wie oft erwähnt, als Verluste durch Hysteresis des Eisens. Man bezeichnet kurz den Verlust an Energie durch Wirbelströme und Hysteresis als Eisenverlust, den durch die Joulesche Wärme als Kupferverlust des Transformators.

Durch alle diese Verluste wird also der an den Klemmen der sekundären Wickelung zur Verfügung stehende Effekt notwendig kleiner sein als der in die primäre Wickelung eingeleitete Effekt. Man bezeichnet das Verhältnis dieser Effekte als den Wirkungsgrad des Transformators und drückt ihn in Prozenten aus.

Bei den neuen Transformatoren steigt der Wirkungsgrad bis zu 96 Proz., so daß man durch die Transformation der elektrischen Energie nur 4 Proz. derselben verliert.

Dieses vorzügliche Resultat erreichten zuerst Ganz & Co. durch eine besondere Konstruktion ihrer Transformatoren und durch möglichste Beschränkung der oben erwähnten Verluste.

Sie machten nämlich zunächst die Eisenmasse des Transformators ringförmig, sie wandten nicht, wie man es noch bei den Induktionsapparaten tut, als Eisenkern einen Stab mit zwei Polen an, sondern sie nahmen einen ganz geschlossenen Eisenkern. Diesen umgaben sie vollkommen mit den beiden Wickelungen. Ein solcher Ring hat keine freien Pole, wenn er magnetisch geworden ist, aber er wirkt genau ebenso induzierend, wenn sich sein Magnetismus ändert, wie jeder mit Polen versehene Magnet. Deswegen nennt man die Transformatoren dieser Art, in welchen also das angewendete Eisen in sich geschlossen ist, pollose Transformatoren. Die geschlossene Form des Eisenkerns hat den großen Vorzug vor der offenen Stabform, daß alle magnetischen Kraftlinien immer ganz im Eisen selbst verlaufen, daß nicht die Kraftlinien zum Teil in die Luft hinaustreten. Es findet also dabei keine Streuung (S. 166) der magnetischen Kraftlinien statt. Wenn der Magnetismus sich ändert, also die Zahl der Kraftlinien vermehrt oder vermindert wird, so geschieht das durchaus innerhalb des Eisenrings, und daher gehen alle die neu entstehenden oder die verschwindenden Kraftlinien durch die Windungen der sekundären Wickelung und erzeugen in diesen daher ohne Verluste Induktionsströme.

Zweitens aber werden solche Eisenkerne, um die Wirbelströme zu verhindern, nicht massiv hergestellt, sondern aus Eisendraht oder Eisenband, wie wir das in anderen Fällen schon mehrfach gesehen haben.

Drittens, um die Hysteresisverluste möglichst zu beschränken, ist es angemessen, die Polwechselzahl im Transformator so klein wie möglich zu machen. Das ist natürlich nur dadurch möglich, daß man überhaupt dem Wechselstrom, der durch die primären Transformator-

windungen geht, möglichst kleine Periodenzahlen gibt. Aus diesem Grunde gerade werden heute die Wechselstrommaschinen ziemlich allgemein nur mit 50 Perioden in der Sekunde, also mit 100 Polwechseln konstruiert.

Endlich, um die Joulesche Wärme in den Transformatoren zu verringern, muß man den Widerstand der Drahtwindungen passend klein wählen. Diese Dimensionierung hat noch, wie wir sehen werden, den weiteren Vorteil, daß die Spannung an den sekundären Klemmen sich dabei sehr wenig ändert, ob nun der sekundäre Stromkreis geschlossen oder offen ist.

Die geschlossene, pollose Form der Transformatoren wurde nun von Ganz & Co. in doppelter Weise erzielt. Bei der ersten Art der Transformatoren wurde ein Eisenring, der aus Drähten oder Bändern oder Blechen zusammengesetzt war, zunächst mit der primären Wickelung umgeben und auf diese wurde die sekundäre Wickelung gebracht, oder es wurden besser die beiden Wickelungen getrennt in einzelnen Sektoren um den Ring gelegt. Die Transformatoren dieser Art werden Kerntransformatoren genannt, weil sie einen Eisenkern haben, auf welchen die beiden Windungssysteme eingewickelt sind.

Dasselbe Ziel eines pollosen Transformators kann man aber auch dadurch erreichen, daß man die beiden Windungssysteme außen mit einem Mantel von Eisen umgibt. Auch dadurch wird das Eisen so magnetisiert, daß nirgends ein freier Pol entsteht, auch dadurch wird also ein polloser Transformator erzeugt. Damit im Eisen die Wirbelströme nicht auftreten können, wird es wieder in Form von oxydierten Drähten angewendet, die senkrecht zu den Kupferdrähten aufgewickelt werden. Diese Transformatoren der zweiten Art nennt man Manteltransformatoren. Der ringförmige Kern wird aus isolierten Kupferdrähten gebildet, die passend zur primären und sekundären Windung zusammengefaßt werden, während außen auf diesen Ringen Eisendraht gewickelt ist. Im ganzen werden jedoch jetzt hauptsächlich Kerntransformatoren, nicht Manteltransformatoren benutzt.

Die Transformatoren, wie sie von Ganz & Co. zuerst konstruiert wurden, hatten tatsächlich die Form eines Ringes aus Eisendrahtbündeln. Indes erwies sich die Herstellung solcher Transformatoren als ziemlich umständlich und kostspielig, und daher werden jetzt zwar allgemein die Eisenkerne in geschlossener Form, aber nicht in Ringform ausgeführt. Man konstruiert sie häufig derart, daß zwei quadratische oder runde Eisenkerne mit den primären und sekundären Spulen abwechselnd umgeben werden, und daß diese Eisenkerne oben und unten durch Eisen miteinander verbunden und so geschlossen werden. So zeigt Fig. 396 den Eisenkern eines Transformators von Helios, während Fig. 397 den Kern, umgeben von den Rollen, abbildet, auf welche die primären und sekundären Wickelungen aufgewunden sind. Der ganze Apparat wird mit einem runden Eisengehäuse umgeben. Man unterscheidet bei jedem Transformator die Leitungen von den beiden Wickelungen als Hochspannungs- und Niederspannungsleitungen, letztere wird auch als Verbrauchsleitung bezeichnet. Häufig werden nicht bloß die beiden Enden der Niederspannungswickelung zu festen Klemmen

an dem Transformator geführt, sondern es wird auch noch von der Mitte dieser Wickelung eine Leitung zu einer festen Klemme zwischen den beiden anderen geführt. Dann herrscht zwischen den beiden äußeren Klemmen die volle Spannungsdifferenz, die in der sekundären Wickelung des Transformators erzeugt wird, zwischen jeder von ihnen aber und der mittleren herrscht nur die halbe Spannungsdifferenz. Das ist häufig von Vorteil. Wenn z. B. die ganze Spannungsdifferenz der Niederspannungsleitung 100 Volt beträgt, so schaltet man Bogenlampen, welche nur die halbe Spannung von 50 Volt brauchen, zwischen die Mittelklemme und je eine

Fig. 396.

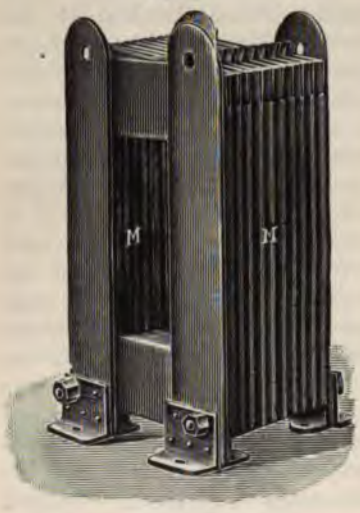
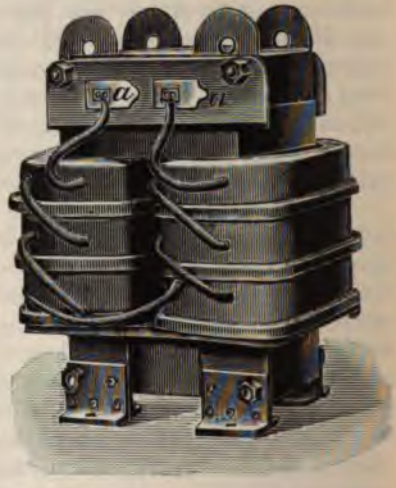


Fig. 397.



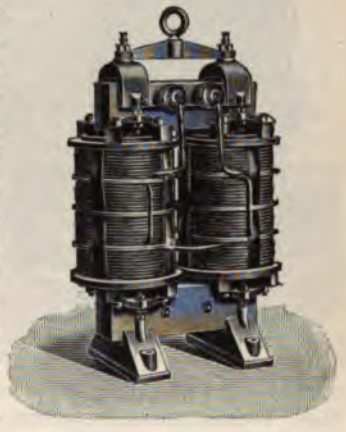
von den Endklemmen. Die Heliostransformatoren haben bei der elektrischen Beleuchtung des Nord-Ostseekanals vielfache Verwendung gefunden.

Von allen größeren Firmen, welche mit Wechsel- oder Drehströmen arbeiten, werden jetzt Transformatoren, meistens Kerntransformatoren, hergestellt, die sich nicht im Prinzip, sondern nur in dem Aussehen und in der Art der Herstellungsweise unterscheiden und die, gutes Material und richtige Dimensionierung vorausgesetzt, alle einen sehr hohen Wirkungsgrad ergeben. Man klassifiziert die Transformatoren, ihrer Größe nach, dadurch, daß man die Leistung, die sie abgeben können, in Kilovoltampere ausdrückt. Wir wissen ja (S. 255), daß bei Wechselströmen das Produkt aus den Volt und Ampere im allgemeinen nicht gleich der wirklichen Leistung in Watt ist, sondern daß die Watt kleiner sind als das Produkt aus den Volt und Ampere. Ein Transformator für 50 Kilovoltampere kann bei induktionsfreier Belastung, also z. B. wenn er nur Glühlampen treibt, 50 Kilowatt abgeben. Ist also die sekundäre Spannung, die er liefern soll, 100 Volt, so kann er Strom bis zu 500 Ampere abgeben. Bei induktiver Belastung ist seine Leistung geringer.

Einen Transformator der Siemens-Schuckertwerke (Modell LWT) zeigt Fig. 398. Derselbe besitzt einen inneren Eisenkern mit darüber gelegten primären und sekundären Spulen. Diese Transformatoren werden gewöhnlich für 100 bis 120 Polwechsel (50 bis 60 Perioden) konstruiert. Die primären Spannungen, die sie aufnehmen sollen, können zwischen 5000 und 10 000 Volt betragen, die sekundären Spannungen nach Belieben 115, 230 und 525 Volt. Dabei hat der kleinste Transformator für 7,5 Kilovoltampere einen Wirkungsgrad von 95 Proz., der größte von 100 Kilovoltampere einen solchen von 98 Proz. Diese Wirkungsgrade gelten für den Fall, daß der Transformator in den sekundären Stromkreis den Maximalstrom sendet, für den er konstruiert ist. Man sagt dann, der Transformator ist vollbelastet.

Ein Hauptaugenmerk ist bei allen Transformatoren auf vorzügliche Isolierung der Hochspannungsrollen zu richten. Da diese Spannungen von vielen Tausenden Volt führen, so ist der kleinste Fehler in der Isolation geeignet, ein Durchschlagen von Funken herbeizuführen und dadurch den Transformator unbrauchbar zu machen. In vielen Fällen begnügt man sich deshalb nicht mit der trockenen Isolierung der Transformatorspulen durch Glimmer und andere Materialien, sondern man stellt den ganzen Transformator in Öl und bezeichnet die dafür eingerichteten Apparate als Öltransformatoren. Natürlich muß das Öl dafür besonders ausgesucht sein. Es muß ausgezeichnet isolieren, darf die Metallteile und Umspinnungen der Apparate nicht angreifen und darf nicht von selbst bei Erwärmung entflammen. Denn durch die in den Spulen auftretende Joulesche Wärme wird natürlich das Öl erhitzt. Die angewendete Menge Öl wird so normiert, daß diese Erwärmung einen bestimmten Betrag, 50 bis 60°, nicht überschreitet. Die Ölisolation wurde zuerst auf der Frankfurter elektrischen Ausstellung (1891) angewendet, als es sich darum handelte, Transformatoren zu konstruieren, die Spannungen bis zu 30 000, ja 40 000 Volt aushalten sollten. Die Isolation für solch hohe Spannungen gelang zuerst der Maschinenfabrik Oerlikon und der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin in vortrefflicher Weise eben dadurch, daß der ganze Transformator in einen Kasten voll Öl eingesetzt wurde. Das Öl dringt durch alle Poren und isoliert vorzüglich.

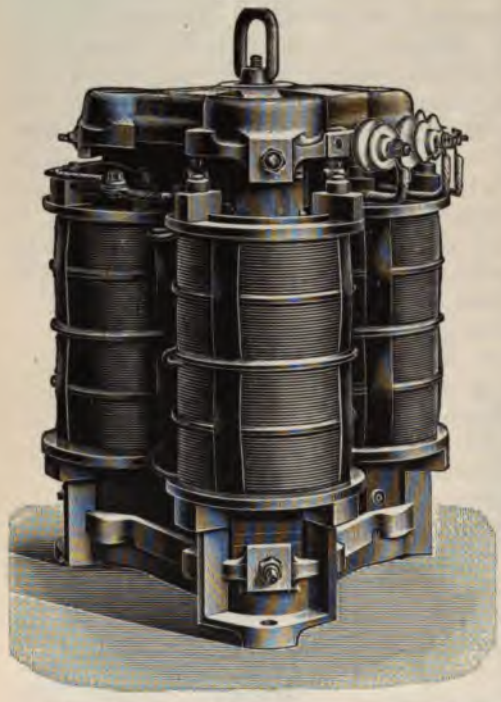
Fig. 398.



Ein besonderer Fall von Transformatoren sind die Drehstromtransformatoren. Unter Drehstrom versteht man ja ein System dreier Wechselströme, welche gegeneinander Phasenunterschiede haben. Man kann daher die drei Wechselströme transformieren, indem man jeden durch ein besonderen Transformator gehen läßt. Die transformierten Ströme haben dann, wenn die Transformatoren gleich gebaut sind, dieselbe Phasendifferenz wie die eingeleiteten primären Ströme. Man kann

diese drei Transformatoren dann auch wieder verketten. Aber man kann auch die drei Transformatoren in einem Apparat vereinigen, indem man die drei Eisenkerne oben und unten durch Eisen miteinander verbindet, so daß jeder Kern durch die beiden anderen geschlossen ist, also pollose Magnete bildet. Die Anordnung kann man dabei noch auf mehrfache Weise treffen. So sind bei den Drehstromtransformatoren der Siemens-Schuckertwerke (Modell LDT) Fig. 399 die drei Eisenkerne im Dreieck aufgestellt und oben und unten miteinander verbunden. Um jeden Eisenkern sind die primären und sekundären Spulen konzentrisch gelegt. Die drei Enden der drei Leitungen der Hochspannung und die der Niederspannung führen zu Anschlußklemmen auf entgegengesetzten Seiten des Transformators.

Fig. 399.



Bei den Drehstromtransformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, die alle mit Ölisolation versehen sind (ebenso wie ihre Wechselstromtransformatoren), sind die drei Eisenkerne in eine Ebene gestellt, wie man aus Fig. 400 sieht, und ebenso konzentrisch mit den beiden Wickelungen umgeben. Sie werden für Primärspannungen bis 10 000 Volt konstruiert. Der ganze Transformator befindet sich in einem Ölkasten, der entweder glatt, wie Fig. 401, oder gewellt ist. Auch bei diesem Transformator gehen die Wirkungsgrade bis zu 98 Proz.

Fig. 400.

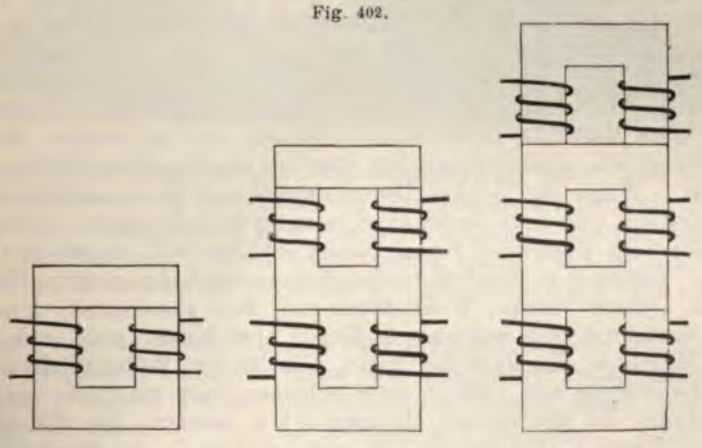
Man kann auch die Eisenkerne übereinanderlagern, wie es die Maschinenfabrik Schwarzkopff mit ihren Transformatoren tut. So zeigt in Fig. 402 die erste Figur die Eisenanordnung eines Transformators für gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom, die zweite für einen zweiphasigen Strom, die dritte für einen Drehstrom. Diese Anordnung empfiehlt sich namentlich bei beschränktem Raum.

Bei allen Transformatoren wird der Widerstand in der sekundären Spule (Niederspannung) immer so klein gemacht, daß die Joulesche Wärme nur 1 Proz. etwa der gesamten Energie bei Vollbelastung (Maximalstrom) beträgt. Damit ist nun zugleich der Vorteil verbunden, daß der Spannungs-

verlust in einer solchen Spule selbst beim maximalen Strom sehr gering ist. Daher ist die Klemmenspannung dieser Spule immer nahezu gleich der elektromotorischen Kraft des sekundären Stromes. So ist z. B. bei den besseren Transformatoren der verschiedenen Firmen der Unterschied in der Klemmenspannung der sekundären Klemmen, wenn diese einmal vollkommen unverbunden, das andere Mal durch einen so kleinen Widerstand geschlossen sind, daß der Maximalstrom fließt, nur 2 bis 3 Proz. der ganzen Spannung. Daher bleibt bei allen äußeren Widerständen, d. h. bei jeder Arbeit, die der Transformator leistet, die sekundäre Klemmenspannung dieselbe, so lange die primäre Klemmenspannung und die Stromwechselzahl unverändert gelassen werden. Daraus folgt, daß ein solcher gut gebauter Transformator immer konstante Klemmenspannung an den sekundären Klemmen hat, wenn nur die primäre Klemmenspannung dauernd gleich erhalten wird. Das ist aber ganz besonders wichtig, weil, wie wir sehen werden, die Verteilung der Energie in rationeller Weise nur dadurch ausgeführt werden kann, daß die Klemmenspannung an dem stromliefernden Apparat (hier den sekundären Klemmen des Transformators) dieselbe bleibt, wie groß oder klein auch der äußere Widerstand sei. Daher eignen sich die Transformatoren ausgezeichnet zur Verteilung der Energie.

Fig. 401.

Fig. 402.



Durch die Transformatoren hat man es also bei Wechselströmen in der Hand, die beiden Faktoren, von denen der Effekt eines Stromes abhängt, nämlich Spannung und Stromstärke, beliebig zu ändern, die eine auf Kosten der anderen zunehmen, oder zu Nutzen der anderen abnehmen zu lassen. Und dabei haben die Wechselstromtransformatoren die großen Vorzüge, daß sie einen sehr hohen Nutzeffekt besitzen und daß sie keine Bedienung gebrauchen. Sie enthalten eben keine beweglichen Teile, sondern nur feste Drahtwindungen. Daher kann man durch solche Apparate

leicht Wechselströme von hoher Spannung in solche von geringer transformieren und daher auch alle die Vorteile ausnutzen, welche die hohe Spannung eines Stromes bei geringer Stärke für die ökonomische Fortleitung bietet.

Für Gleichströme ist eine solche Transformation durch feste Apparate, ohne bewegliche Teile, und namentlich eine Transformation für sehr hohe Spannungen noch nicht gelungen.

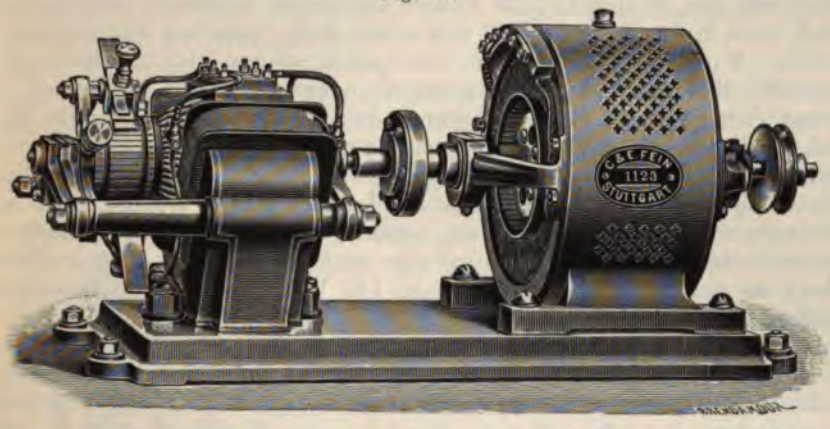
Dagegen sind für Gleichströme Transformatoren zu anderen Zwecken gebaut worden. Es kommt zuweilen vor, daß in einer elektrischen Anlage, welche mit Gleichströmen von etwa 110 Volt Spannung betrieben wird (wie in den meisten Zentralen), daß in dieser für einige Zwecke höhere Spannungen gebraucht werden. Wenn z. B. eine Akkumulatorenbatterie von 100 Zellen von diesem Leitungsnetz geladen werden soll und man nicht die Zellen in mehrere Abteilungen teilen will, so braucht man dazu eine Spannung von etwa 250 Volt. Oder wenn eine Trambahn elektrisch von diesem Netz betrieben werden soll, so braucht man für diese gewöhnlich höhere Spannungen, 300 bis 500 Volt. Es handelt sich also hier häufig darum, Gleichströme von niedriger Spannung (110 Volt) auf höhere Spannung (250 oder 500 Volt) zu transformieren, wenn auch nicht darum, sie auf sehr hohe Spannung, Tausende von Volt, zu bringen. Man kann diese Aufgabe in folgender Weise lösen. Es werden zwei Gleichstrommaschinen zusammengekoppelt, indem sie entweder eine gemeinschaftliche Achse besitzen oder durch Riemen miteinander verbunden werden. Die eine dieser Maschinen dient als Elektromotor, d. h. sie wird durch einen hineingeführten (den zu transformierenden) Strom getrieben. Dadurch dreht sie zugleich die zweite Maschine und von deren Bürsten lassen sich dann Ströme abnehmen. Der Anker der zweiten Maschine ist nun so gewickelt, daß er bei derselben Tourenzahl eine größere oder geringere elektromotorische Kraft liefert als der erste. Folglich erhält man vermittels des in die erste Maschine eintretenden Stromes von der zweiten Maschine einen Strom von anderer Spannung, man hat die eingeführte Energie transformiert. Wenn die beiden Dynamomaschinen Nebenschlußmaschinen sind, so kann man sehr leicht die Spannung des sekundären Stromes, den man aus dem gegebenen transformiert erhalten will, in weiten Grenzen ändern. Indem man nämlich in den Nebenschluß der zweiten Maschine, die als Dynamo wirkt, Widerstände ein- und ausschaltet, kann man deren Spannung, wie bekannt, ändern. Aber indem man auch bei der ersten Maschine, die als Motor wirkt, dasselbe tut, Widerstände aus ihrer Magnetwickelung aus- oder in sie einschaltet, kann man, wie wir bei der Behandlung der elektrischen Motoren sehen werden, ihre Geschwindigkeit verändern. Dadurch ändert sich aber auch die Geschwindigkeit der zweiten Maschine, der Dynamo, in derselben Weise, und man hat dadurch ein zweites, mit dem ersten zusammenwirkendes Mittel, um die Spannung des erzeugten Gleichstromes in weiten Grenzen zu regulieren.

Da man aber, wie oft erwähnt, Gleichstromdynamos nicht für sehr hohe Spannungen bauen kann, so ist der Bereich, in welchem eine Transformation bei Gleichströmen überhaupt möglich ist, ein ungleich geringerer als bei Wechselströmen. Während es bei den letzteren ganz ein-

fach ist, einen Strom von 5000 oder 10 000 Volt Spannung in einen solchen von 100 Volt zu transformieren oder umgekehrt, kann man bei Gleichströmen im allgemeinen schon zufrieden sein, wenn man von 100 Volt auf 500 Volt oder umgekehrt umformen kann. Außerdem brauchen natürlich die beiden Maschinen, wie alle Apparate mit bewegten Teilen, dauernde Aufsicht, während diese bei den eigentlichen Wechselstromtransformatoren nicht nötig ist.

Dasselbe Prinzip der zusammengekoppelten Maschinen ist auch anwendbar, um Gleichströme in Wechselströme zu verwandeln und umgekehrt. Man muß nur zu dem Zweck auf eine und dieselbe Achse eine Wechselstrommaschine und einen Gleichstrommotor, oder eine Gleichstrommaschine und einen Wechselstrommotor setzen. In den Motor leitet man im ersten Falle Gleichstrom ein und erhält von der Dynamo-

Fig. 403.



maschine Wechselstrom zurück. Im zweiten Fall leitet man in den Motor Wechselstrom ein und erhält von den Bürsten der Dynamo Gleichstrom zurück. Wenn man z. B. in einem Leitungsnetz, das von Wechselströmen betrieben wird, einen Akkumulator laden will, so muß man einen solchen Wechselstrom-Gleichstromumformer einführen.

Es ist von selbst ersichtlich, daß man auf dieselbe Weise auch Gleichstrom in Drehstrom umformen kann und umgekehrt, indem man eine Gleichstrom- und eine Drehstrommaschine auf dieselbe Achse setzt. So zeigt Fig. 403 einen kleinen, für Schulzwecke geeigneten, Drehstrom-Gleichstromumformer von C. & E. Fein in Stuttgart. Man sieht rechts einen Drehstrommotor, welchem also von außen Drehstrom zugeführt wird, und links auf derselben Achse eine Gleichstromdynamo, von deren Bürsten man also Gleichstrom abnehmen kann.

Die Umformer, welche aus Wechselstrom oder Drehstrom Gleichstrom erzeugen, haben eine erhebliche und wichtige Anwendbarkeit. Wie nämlich schon mehrfach erwähnt wurde, macht die Anwendung der Wechselströme und insbesondere der Drehströme in den großen elektrischen Anlagen immer größere Fortschritte, weil diese sich als bedeutend

ökonomischer in Hinsicht der Fortleitung und Verteilung erweisen. Für manche Zwecke aber sind Wechselströme durchaus unbrauchbar, nämlich für alle elektrochemischen Betriebe und für alle Anlagen, in welchen Akkumulatoren zu laden sind. Diese können nur mit Gleichstrom betrieben werden, und gerade aus diesem Grunde werden zuweilen in städtischen Anlagen zwar Drehströme von hoher Spannung erzeugt und fortgeleitet, aber in den einzelnen Bezirken, in denen sie gebraucht werden, werden sie durch Umformer in Gleichstrom verwandelt.

Übrigens ist es noch auf gänzlich abweichende Art und Weise möglich, Wechselströme und Drehströme in Gleichströme zu verwandeln und zwar ganz ohne rotierende Apparate. Und zwar sind es die elektrolytischen Vorgänge an einer Aluminiumanode, welche dieses ermöglichen. Es wurde auf S. 154 angeführt, daß eine gewöhnliche Zersetzungszelle, die etwa Alaunlösung als Flüssigkeit besitzt und bei welcher eine Elektrode aus Aluminium, die andere aus einem beliebigen indifferenten Stoff, etwa Kohle, besteht, daß eine solche Zelle besondere Eigenschaften besitzt. Wird nämlich ein Strom durch sie in solcher Richtung hindurchgesendet, daß sich Sauerstoff an der Aluminiumelektrode abscheidet, so bringt dieser eine so schlecht leitende Schicht an dieser Elektrode hervor, daß Ströme unter 22 Volt Spannung nur in minimalen Beträgen durchgelassen werden, während, wenn der Strom in umgekehrter Richtung hindurchgeht, er kein besonderes Hindernis findet. Wendet man als Flüssigkeit nicht Alaunlösung an, sondern die Lösung eines phosphorsauren Salzes (Ammoniumphosphat oder auch Kalium- oder Natriumphosphat), so werden sogar Ströme bis zu 140 Volt Spannung in derjenigen Richtung, in welcher die Aluminiumelektrode mit dem positiven Pol verbunden ist, außerordentlich geschwächt, so daß nur ganz schwache Ströme in dieser Richtung hindurchgehen. Man kann daher solche Graetzsche Zellen oder Drosselzellen auch zur Gleichrichtung eines Wechselstromes benutzen. Schickt man nämlich einen Wechselstrom z. B. von 110 Volt Spannung durch eine solche Zelle hindurch, so werden offenbar diejenigen Teile des Wechselstromes, in welchen das Aluminium Anode ist, nicht hindurchgelassen, während die anderen Hälften hindurchgehen. Man bekommt also in der Leitung unterbrochenen Gleichstrom. Aber man verliert dabei zunächst die Hälfte des ganzen Stromes. Indes kann man durch eine besondere Schaltung, welche man die Graetzsche Schaltung nennt, es auch bewirken, daß man den ganzen Wechselstrom in (pulsierenden) Gleichstrom verwandelt. Diese Schaltung ist in Fig. 404 angegeben. Es bedeutet darin M eine Wechselstrommaschine und A_1, A_2, B_1, B_2 stellen 4 solche Graetzsche Zellen dar, bei denen die langen Striche immer die Aluminiumelektrode, die kurzen die andere Elektrode bedeuten. Mit jedem der beiden Pole C und D der Maschine verbindet man zwei solche Zellen parallel und zwar die eine mit der Aluminiumelektrode, die andere mit der Kohleelektrode. Die freien Aluminiumelektroden von A_1 und B_1 werden dann durch einen Draht A_1HB_1, die freien Kohleelektroden durch einen Draht A_2GB_2 verbunden und zwischen diese beiden Leiter werden dann die Apparate W eingeschaltet, in denen Gleichstrom fließen soll. Ist nämlich in einem Moment z. B. der Pol C positiv, so kann der Strom von ihm nur über CA_1 bis H, dann

durch W in der Richtung des Pfeiles nach G fließen (da ihm der Weg durch B_1 versperrt ist, weil dort die Aluminiumelektrode Anode würde) und von G über B_2 zum negativen Pol D. Ist in der nächsten halben Periode des Wechselstromes C negativ, also D positiv, so fließt der Strom von D über B_1 (in B_2 wäre Aluminium Anode) nach H, dann auch wieder in der Richtung des Pfeiles nach G (denn der Weg über A_1 ist versperrt) und von G über A_2 nach dem negativen Pol C. Beide Hälften des Wechselstromes sind also in dem Leiter HG gleichgerichtet. Man bezeichnet deswegen eine solche Kombination von 4 Zellen in dieser Schaltung auch als Gleichrichter. Obwohl dieses Verfahren für die Anwendung im großen noch nicht durchgebildet ist, ist es sehr bequem und ohne große Kosten da zu benutzen, wo es sich nur darum handelt, für kleine Apparate, also für geringe Stromstärken aus einer Wechselstromanlage Gleichstrom zu entnehmen. Die Formen, die man den Elektroden gibt, sind unwesentlich, nur hat es sich als vorteilhaft erwiesen, dafür zu sorgen, daß die Aluminiumelektrode immer von der Flüssigkeit bedeckt ist. Eine Form dieser Zellen, die von Nodon herrührt, ist in Fig. 405 gezeichnet. Ein Doppelzylinder EE von Eisen, dessen innere Wand perforiert ist, ist unten durch einen Kautschukstopfen K verschlossen. Durch diesen ist die Aluminiumelektrode in Form eines Stabes oder einer Röhre A A hindurchgesteckt. Der Eisenzylinder bildet selbst die zweite Elektrode. Er wird mit Ammoniumphosphat gefüllt, welches durch die Löcher hindurch das Aluminium bespült. Um mehr oder minder große Flächen des Aluminiums wirken zu lassen, kann ein Schutzrohr K aus Hartgummi über dasselbe gestülpt werden. Da sich die Flüssigkeit beim Betrieb der Gleichrichter stark erwärmt, ist es vorteilhaft, große Gefäße anzuwenden oder künstliche Kühlung einzurichten. Die Apparate sind bisher bis zu 4 Kilowatt Leistung mit 75 Proz. Nutzeffekt gebaut worden. Falls sich diese Methode für große Leistungen auch technisch brauchbar ausbilden läßt, würde sie eine wesentliche Anwendbarkeit für viele Zwecke besitzen. Denn in dem sehr wichtigen Punkte der weiten Fortleitung elektrischer Energie ist gerade durch die Möglichkeit der Transformation von hohen Spannungen auf niedere und umgekehrt der Wechselstrom resp. Drehstrom dem Gleichstrom noch wesentlich überlegen, während für die

Fig. 404.

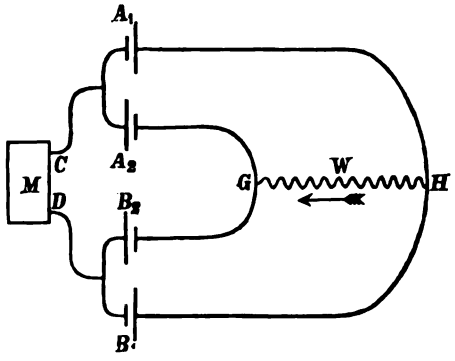
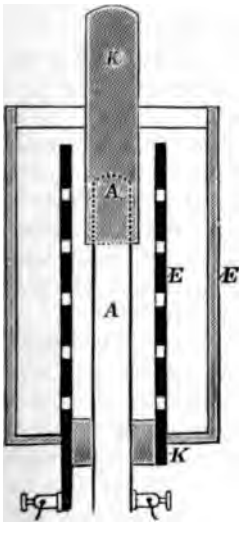


Fig. 405.



Anwendung zum Betrieb von Lampen und Motoren der Gleichstrom doch manche Vorteile hat, zum Laden von Akkumulatoren aber sogar unentbehrlich ist.

Es hat sich allmählich eine Scheidung der Kompetenzen zwischen Wechselstrom (resp. Drehstrom) und Gleichstrom in der Art ausgebildet, daß für weite Entfernungen der Stromverbrauchsplätze untereinander und von der Maschine der Drehstrom mit Transformatoren eintritt, während für enge, kleine Betriebe der Gleichstrom das Übergewicht hat. In der Tat sind jetzt eine große Reihe von elektrischen Anlagen mit hochgespannten Drehströmen und Transformatoren bereits ausgeführt an Orten, wo ohne eine ökonomische Fernleitung hochgespannter Ströme eine zweckmäßige elektrische Einrichtung nicht möglich gewesen wäre.

5. Kapitel.

Das elektrische Bogenlicht.

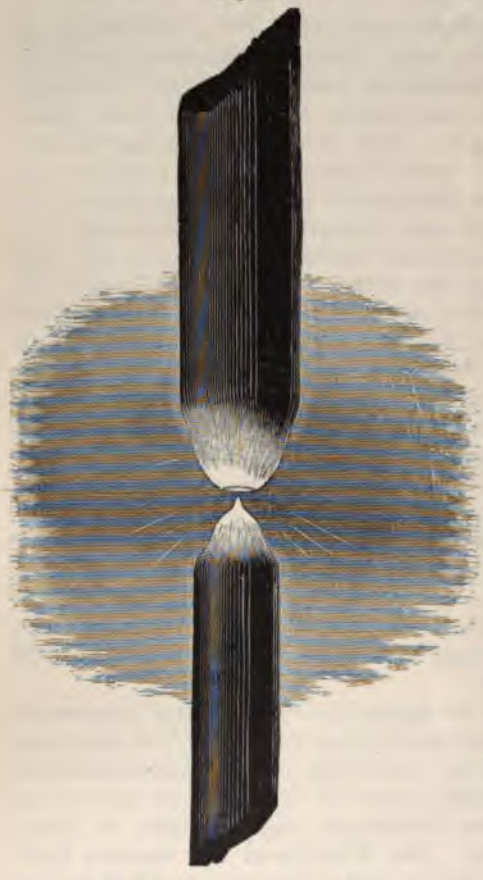
Den Hauptanstoß zu der großen Entwickelung der Elektrotechnik seit dem Jahre 1880 gab das Bedürfnis nach allgemeiner Einführung der elektrischen Beleuchtung. Elektrisches Licht hatte man zwar lange schon im Laboratorium für Vorlesungsversuche und zuweilen auch öffentlich für besondere Zwecke gemacht. Man scheute für solche Zwecke auch nicht die umständliche und teure Verwendung von kräftigen galvanischen Batterieen. Sollte das elektrische Licht aber praktisch verwendet werden, sollte es möglich sein, dasselbe zur Beleuchtung von Straßen, Plätzen und großen Räumen zu benutzen, so kam es vor allen Dingen darauf an, die Erzeugung des nötigen elektrischen Stromes bequemer und viel billiger zu machen, als man es durch Anwendung von galvanischen Batterieen erreichen konnte. Dies war eine der wesentlichsten Ursachen, daß sich die Technik mit besonderer Wucht auf die Erzeugung von elektrischen Strömen durch direkte Aufwendung von Arbeit warf, und die Dynamomaschinen, welche dies mit Hilfe der Induktion erreichen ließen, waren das Hauptresultat dieser Anstrengungen.

Das elektrische Licht entsteht, wie auf S. 115 ff. auseinandergesetzt ist, wenn ein starker elektrischer Strom zwischen zwei Kohlenspitzen übergeht, die durch eine kleine Strecke erhitzter Luft voneinander getrennt sind. In dem ziemlich großen Widerstand, welchen eine solche Luftstrecke dem Strom bietet, wird nach dem Jouleschen Gesetz eine große Wärmemenge erzeugt und diese bleibt, da die Luftstrecke zwischen den Kohlen nur klein ist, konzentriert an dieser Stelle und erhitzt sowohl die Luft wie die Enden der Kohlen selbst.

Die Erfahrung lehrt nun, daß bei einem mit Gleichströmen betriebenen Lichtbogen eine Spannung zwischen den Kohlen von ca. 40 Volt herrschen muß, damit der Lichtbogen entstehe, bei einem mit Wechselströmen betriebenen dagegen eine viel kleinere, etwa 28 Volt. Es ist noch nicht vollständig aufgeklärt, warum ein Lichtbogen nur mit einer so hohen Spannung betrieben werden kann. Der Widerstand der warmen Luftschicht ist nicht so groß, daß er diesen großen Spannungsverlust hervorbringen könnte. Es kann sein, daß in dem Lichtbogen, d. h. in der Luftschicht, eine Art Polarisation entsteht, wie in einer Flüssigkeit, und daß diese eine hohe Gegenkraft entwickelt. Es kann aber auch sein, daß bei dem Übergang des Stromes aus den Kohlen in die Luft ein hoher Übergangswiderstand erzeugt wird, wie bei den Aluminiumzellen (S. 154). Wie gesagt, ist diese Frage noch nicht definitiv aufgeklärt. Tatsache ist jedenfalls, daß man, um Bogenlicht zu erzeugen, an den Enden der Kohlen eine Klemmenspannung anwenden muß, die immer größer als 40 Volt ist, wenn man Gleichströme benutzt. Bei Wechselstrom muß sie größer sein

als 28 bis 30 Volt, je nach der Periode und Form der Wechselströme. Kommt ein Strom in die Kohlen, zwischen welchen eine Unterbrechungsstelle gebildet wird, dann werden die Enden der Kohlen und die zwischen ihnen liegende Luftschicht heiß, sie fangen an zu glühen und werden nach ganz kurzer Zeit ganz hell weißglühend. Auch die Luft zwischen ihnen wird durch die hohe Temperatur, welche zwischen 2000 und 4000° C. liegt, glühend. Die glühenden Kohlenenden scheinen direkt in Dampfform überzugehen, zum Teil reißen sich auch fortwährend von ihnen Teilchen ab und fliegen glühend durch die Luftschicht hindurch zu der gegenüberliegenden Elektrode. Dies ist das allgemeine Bild des elektrischen Bogenlichts oder des Flammenbogens. Das eigentlich Leuchtende im elektrischen Licht ist nicht der Flammenbogen, welcher als glühendes Gas nur wenig Licht aussendet. Das eigentlich Leuchtende sind vielmehr die weißglühenden Enden der Kohlenelektroden selbst. Von beiden Elektroden aus fliegen glühende Kohlenteilchen fort, sowohl durch die Luftschicht hindurch zu der anderen Elektrode, als seitlich in den freien Raum. Aber diese Zerstäubung der Elektroden ist nicht bei beiden die gleiche. Von der positiven Kohle reißen sich die Teilchen in weit größerer Zahl ab als von der negativen, und so kommt es, daß wenn das Bogenlicht eine Zeitlang besteht und wenn immer dieselbe Kohle mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden ist, also wenn Gleichströme angewendet werden, daß dann die positive Kohlenelektrode sehr bald sich aushöhlt und einen weißglühenden Krater bildet. Zugleich hat die positive Kohle eine viel höhere Temperatur als die negative, 3500 gegen 2500°. Die negative Kohle bleibt während des Vorganges immer erhaben und spitzt sich zu. Man sieht das Bild der beiden Kohlen in Fig. 406. Auf den Kohlenenden sieht man fortwährend eine Menge von runden Partikelchen hin und her laufen und sich warzenförmig an beliebige Stellen ansetzen. Es rühren diese von Verunreinigungen der Kohlen her, welche durch die große Glut schmelzen.

Fig. 406.



Die Kohlen für elektrisches Licht werden besonders fabrikmäßig hergestellt und zwar verwendet man entweder nur aus Kohlenpulver unter einem Druck von 200 bis 400 Atmosphären gepreßte Kohlenstäbe (sogenannte Homogenkohlen) oder aber man macht die Kohlenstäbe hohl und versieht sie mit einem Kern aus Kohle, die mit einer leicht flüchtigen, hellleuchtenden Substanz imprägniert ist (sogenannte Dochtkohlen). Fig. 406 zeigt oben als positive Kohle eine Dochtkohle, unten als negative eine Homogenkohle. Das Dochten der Kohlen hat den Zweck, zu bewirken, daß der Lichtbogen immer von der Mitte der Kohle ausgeht.

Die Kohlen brennen in der Glühhitze durch das Hinzutreten des Sauerstoffs der Luft allmählich ab, und zwar, wie erwähnt, bei Gleichströmen die positive Kohle rascher als die negative. Deswegen nimmt man bei den elektrischen Lampen für Gleichstrom die positive (obere) Kohle gewöhnlich doppelt so dick als die untere (wie auch Fig. 406 zeigt), damit beide Kohlenstäbe nahezu gleich lange brennen können. Es läßt sich aber leicht einsehen, daß elektrisches Licht sich auch durch schnell wechselnde Wechselströme erzeugen lassen muß. Denn die Erwärmung der Elektroden hängt ja nach dem Jouleschen Gesetz ab von dem Quadrat der Stromstärke, nicht von der Richtung des Stromes. Ob also der positive Strom in der einen Richtung oder in der anderen Richtung durch die Kohlen fließt, die Erwärmung bleibt immer dieselbe, wenn die äußeren Verhältnisse dieselben bleiben. Von der Erwärmung hängt aber direkt die Lichtmenge ab, welche die Kohlen ausstrahlen können, und daher sind Wechselströme ebenso geeignet zur Erzeugung des elektrischen Bogenlichtes wie Gleichströme, wenn nur die Wechselströme rasch aufeinander folgen. Bei den Wechselstrommaschinen, wie sie jetzt konstruiert werden, finden in jeder Sekunde etwa 100 Stromwechsel statt, eine Zahl, welche vollkommen ausreicht, um das durch die Ströme erzeugte Licht als ganz kontinuierlich erscheinen zu lassen.

In einer anderen Beziehung dagegen findet ein Unterschied im elektrischen Licht statt, je nachdem es von Wechselströmen oder von gleichgerichteten Strömen erzeugt wird. Wenn durch die Kohlen ein stets gleichgerichteter Strom fließt, so bildet sich an der positiven Elektrode eine leuchtende Vertiefung, ein leuchtender Krater. Bei den elektrischen Lampen für Gleichstrom, deren Beschreibung im folgenden gegeben wird, wird nun stets die obere Kohle zur positiven Elektrode gemacht, d. h. mit dem positiven Pol der Dynamomaschine verbunden. Es bildet dann gewissermaßen die positive Kohle einen Reflektor, durch welchen die Lichtstrahlen nach unten geworfen werden. Das Licht breitet sich nicht gleichmäßig nach allen Seiten aus, sondern es wird mehr Licht nach unten geworfen, als nach den Seiten geht. Und da man gewöhnlich unten das Licht braucht, so ist das sehr vorteilhaft. Bei Anwendung von Wechselströmen dagegen wird abwechselnd jede Kohle bald positive, bald negative Elektrode. Infolgedessen brennen beide Kohlen gleich rasch ab; es bildet sich kein Krater in ihnen, sondern sie bleiben beide zugespitzt, wie sie es von vornherein waren. Um daher in diesem Falle die Hauptmenge des Lichts nach unten zu werfen, muß man künstlich Reflektoren anwenden, was man bei Gleichströmen nicht nötig hat.

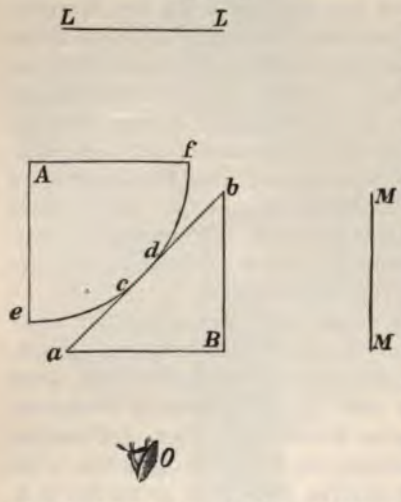
Läßt man elektrisches Licht frei, d. h. ohne Glocke brennen, so ist

die Lichtstärke, welche man durch ein Photometer messen kann, bei Gleichströmen ganz erheblich verschieden, je nach der Richtung, in welcher das Licht auf das Auge oder das Photometer fällt. Es ist z. B. bei einer Lampe, die durch Gleichströme gespeist wird, die Stärke des Lichtes, wenn es in horizontaler Richtung beobachtet wird, nur etwa der fünfte Teil von der, welche es zeigt, wenn unter 60^0 gegen die Horizontale beobachtet wird. Man muß deshalb elektrisches Licht, welches von Gleichströmen erregt wird, stets so hoch anbringen, daß die Strahlen unter bestimmtem Winkel auf die zu beleuchtende Fläche fallen. Bei Anwendung von Glocken werden die Unterschiede der Helligkeit in verschiedenen Richtungen vermindert.

Um ein Urteil über die Helligkeit des elektrischen Lichtes zu haben, muß man dasselbe mit anderen leuchtenden Körpern vergleichen. Diese Vergleichung vorzunehmen, ist die Aufgabe der Photometrie.

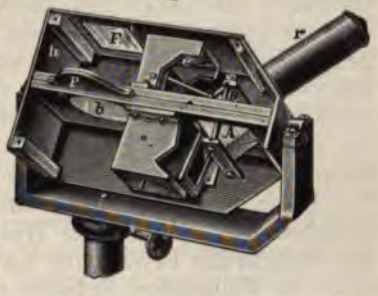
Es wird jetzt zur genauen Vergleichung von Lichtstärken gewöhnlich das Lummer-Brodhunsche Photometer benutzt. Es besteht dasselbe, wie die schematische Fig. 407 zeigt, aus zwei Glasprismen A und B, die in einem Flächenstück c d dicht aufeinandergepreßt sind. Wenn dieses System von einer Lichtquelle L L beleuchtet wird, so gehen die Strahlen durch c d ohne weiteres hindurch und treffen in ein bei O befindliches Auge, während die Strahlen, die auf f d und c e fallen, dort reflektiert werden, also nicht nach O gelangen. Das Auge sieht also einen hellen Kreis c d in dunklem Felde. Wird das System der Prismen dagegen von der Lichtquelle M M beleuchtet, so gehen die Strahlen durch c d direkt hindurch nach links, während sie von a c und d b nach unten reflektiert werden und in das Auge O fallen. Das Auge sieht also einen dunklen Kreis c d in hellem Felde. Wirken nun beide Lichtquellen zu gleicher Zeit, so wird der Kreis hell auf dunkel oder dunkel auf hell sein, je nachdem von L L oder M M mehr Licht auf das Prismensystem kam, und der Kreis wird sich von seiner Umgebung nicht abheben, sondern ebenso hell sein wie diese, wenn das Prismensystem von beiden Quellen gleich stark beleuchtet ist. Damit die beiden Lichtquellen nicht, wie aus der eben gegebenen Darstellung hervorgeht, unter rechtem Winkel zu dem Photometer zu stehen brauchen, sondern, was viel bequemer ist, in einer geraden Linie mit dem Photometer liegen, wird das Prismensystem in einem Apparat angebracht, den Fig. 408 geöffnet zeigt. Bei A B sieht man in diesem das Prismensystem, welches durch ein kleines Fernrohr r beobachtet wird. Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werfen ihr Licht, jede durch ein Fenster F (das andere, vordere ist in der Figur fortgelassen), auf die

Fig. 407.



beiden Seiten eines Porzellanschirmes P, von welchem nur die eine Seite b sichtbar ist. Das von diesem zurückgeworfene Licht fällt auf je einen Spiegel e und f, und diese werfen das Licht dann in der richtigen Weise durch das Prismensystem. Man muß nun das Photometer so lange auf einer zwischen den beiden Lichtquellen befindlichen Bank verschieben, bis Kreis und Umgebung gleich hell erscheinen. Dann wird das Photometer von beiden Lichtquellen gleich hell beleuchtet, und in diesem Falle verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen direkt wie die Quadrate ihrer Abstände vom Photometer. Man kann auf diese Weise Lichtstärken miteinander vergleichen.

Fig. 408.



Das Photometer wird verschiebbar auf einer Bank angebracht, die mit einer Längsteilung versehen ist. Das Zimmer, in dem die photometrischen Messungen vorgenommen werden, muß natürlich ganz verdunkelt sein, so daß außer von den zu vergleichenden Lichtquellen kein Licht auf das Photometer fällt.

Als Lichteinheit, mit der man alle Lichtstärken vergleichen kann, wird jetzt in Deutschland das Licht einer Lampe benutzt, welche von v. Hefner-Alteneck konstruiert wurde, der Amylacetatlampe. In dieser verbrennt reines Amylacetat durch einen Docht, der etwa 8 mm inneren und 8,1 mm äußeren Durchmesser besitzt. Die Lampe, welche in Fig. 409 abgebildet ist, und die als Hefnersche Normallampe bezeichnet wird, hat, wenn man der Flamme eine Höhe von 40 mm gibt, eine Lichtstärke, welche jetzt unter dem Namen „Hefnereinheit“ oder Hefnerkerze (HK) als Einheit benutzt wird. Um die Höhe der Flamme zu messen, befindet sich rechts auf der Lampe ein sogenanntes Flammenmaß. Die Lampe hat den Vorzug der sicheren, stets gleichmäßigen Herstellbarkeit. Eine deutlichere Vorstellung von der Lichtstärke dieser Einheit wird man erhalten, wenn man sich merkt, daß eine gewöhnliche Straßengasflamme oder elektrische Glühlampe eine Helligkeit von ungefähr 16 HK hat.

Fig. 409.

Die Helligkeit des elektrischen Lichtes hängt natürlich ab von der Stärke des Stromes, welcher durch die Kohlen hindurchgeht, und man kann durch Veränderung der Stromstärke die Helligkeit des Lichtes in sehr weiten Grenzen verändern, von einigen hundert Kerzen bis zu vielen Zehntausenden Kerzen Stärke.

Aber auch von der Länge des Lichtbogens, d. h. von der Größe der Zwischenschicht zwischen den beiden Kohlen, hängt bei gleicher Stromstärke die Lichtstärke einer elektrischen Lampe wesentlich ab. Ist die Entfernung zwischen den Kohlenspitzen zu groß, so wird das Licht unruhig, es geht häufig aus; es ist die Grenze beinahe erreicht, bei welcher der Strom nicht mehr hindurchgeht. Infolgedessen ist für den praktischen Gebrauch die Länge des Lichtbogens in Übereinstimmung zu bringen mit der Stromstärke, der Zahl der Ampere, die man durch die Lampe gehen läßt. Im allgemeinen sieht man darauf, daß der Lichtbogen für Lampen, die mit 5 bis 6 Ampere Stromstärke gespeist werden, nur 1 bis 2 mm beträgt, für Lampen von 8 bis 10 Ampere auf höchstens 3 mm steigt und bei den starken Lampen (mit 20 und mehr Ampere Stromstärke) auf etwa 4 bis 5 mm wächst.

Wenn die beiden Kohlen einander berühren, so geht der Strom direkt zwischen ihnen durch, der Widerstand ist nicht mehr groß genug, um eine bedeutende Erwärmung hervorzubringen. Die Kohlenenden kommen nicht ins Weißglühen, es bildet sich gar kein elektrisches Licht. Man muß daher nach der ersten Berührung die Kohlen etwas trennen, damit sich der elektrische Flammenbogen bildet. Hat man aber nun den Kohlen zuerst einen passenden Abstand gegeben, so daß der Lichtbogen eine passende und brauchbare Länge hat, so vergrößert sich, wenn die Kohlen feststehen, dieser Abstand während des Brennens von selbst fortwährend, weil eben die Kohlen durch das Abbrennen (Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft) kleiner werden, und es muß bald der Fall eintreten, daß der Strom den Widerstand der Luftschicht nicht mehr überwinden kann. Der Strom hört dann auf und mit ihm das elektrische Licht.

Es war mithin die erste Forderung für die praktische Benutzung des elektrischen Lichtes, die Kohlenstäbe beweglich zu machen, eine Regulierung zu ersinnen, durch welche die Kohlen stets auf gleichen Abstand voneinander gebracht werden. Diese Regulierung muß eine Reihe von Forderungen erfüllen. Erstens muß sie die Kohlenenden, die von selbst beim Brennen in immer größeren Abstand voneinander kommen, immer wieder einander entgegenbringen, so daß das Licht immer wieder in gleicher Stärke sich entwickelt. Zweitens aber müssen die Kohlen zuerst aneinandergeschoben werden, um dem Strom erst den Durchgang zu gestatten und dann gleich getrennt werden, um den Lichtbogen entstehen zu lassen. Auch dies muß die Regulierung besorgen. Drittens muß die Regulierung etwaige Schwankungen in der Stärke des Stromes ausgleichen, d. h. sie muß den Abstand der Kohlen, also den Widerstand der Lampe vergrößern, wenn der Strom zu stark, ihn verkleinern, wenn er zu schwach wird.

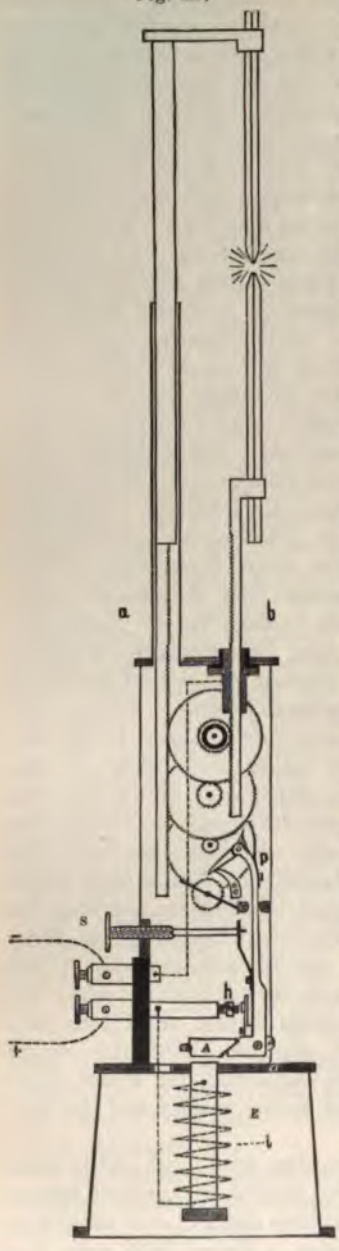
Es wurden deshalb schon seit Beginn der Verwendung des elektrischen Lichtes für Vorlesungszwecke derartige Regulatoren konstruiert, welche man kurz als elektrische Lampen bezeichnet. Es ist selbstverständlich, daß eine so feine Regulierung, welche jeder Schwankung des Stromes folgen muß, nicht möglich ist, ohne daß man den Strom selbst zu dieser Regulierung benutzt. Es muß der Strom, wenn er schwächer wird, von selbst die beiden Kohlen einander nähern, und wenn er stärker wird, sie von selbst voneinander entfernen, so daß sie stets in entsprechen-

dem Abstand voneinander sind. Die Kohlen während des Abbrennens einander zu nähern, das ist eine mechanisch leicht zu lösende Aufgabe. Man braucht ja nur die untere Kohle festzustellen und die obere langsam beweglich zu machen, so daß sie durch ihr eigenes Gewicht beständig sinkt. Es handelt sich dann bloß bei der Regulierung darum, zu verhindern, daß die obere Kohle zu weit sinkt, und vielmehr zu bewirken, daß sie immer gerade bis zur passenden Entfernung an die untere Kohle heranrückt.

Für die Regulierung des Lichtbogens nun ergab sich als einfachstes Mittel die Anwendung eines Elektromagneten. Wenn man den Strom, der das Licht erzeugen soll, um einen Kern von weichem Eisen herumführt, und diesem einen beweglichen Anker gegenüberstellt, so hat man ja darin einen Mechanismus, welcher je nach der Stärke des Stromes starke oder schwache Bewegungen hervorbringen kann. Die Stärke der Anziehungen eines Elektromagneten auf einen Anker ist ja bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen direkt abhängig von der Stärke des Stromes, der durch seine Windungen fließt. Man braucht also nur den Polen des Elektromagneten einen Eisenanker gegenüberzustellen, welcher drehbar befestigt ist, um je nach der Stärke des Stromes eine größere oder geringere Bewegung dieses Ankers zu erhalten. Diese Bewegung des Ankers kann man dann durch gewöhnliche mechanische Mittel, mittels Rädern und Zahnstangen oder sonst irgendwie, auf die eine Kohle übertragen. Wenn also der Abstand der Kohlen zu klein, also die Stromstärke zu groß ist, so wird der Anker vom Magneten angezogen und man kann eben durch Räder oder Zahnstangen bewirken, daß dann die Kohlen voneinander entfernt werden, bis der Widerstand, also auch die Stromstärke wieder normal geworden sind. Wenn aber der Anziehung des Elektromagneten auf seinen Anker keine Kraft entgegenwirken würde, so würde der drehbare Anker stets ganz an den Magneten herangezogen werden. Um dies zu verhindern, muß man der Anziehung des Magneten eine Kraft entgegenwirken lassen, welche den Anker wieder von demselben abzuziehen sucht. Eine solche Kraft hat man z. B. in einer Feder, welche, wenn der Magnet den Anker nach unten zieht, ihn nach oben zu ziehen sucht. Bei einer bestimmten Stellung des Ankers herrscht dann Gleichgewicht zwischen der Anziehung des Magneten und der Feder. Jede Vergrößerung der Stromstärke macht den Magneten stärker, zieht also den Anker herab und spannt dadurch die Feder. Durch diese Herabbewegung des Ankers bringt man nun eine Entfernung der Kohlen voneinander hervor, dadurch wird der Strom schwächer, der Elektromagnet ebenfalls, die Anziehung der Feder überwiegt und bringt dadurch den Anker und die Kohle wieder auf die normale Entfernung.

Nach diesen Prinzipien im allgemeinen wurden schon die ersten elektrischen Lampen konstruiert, die aber noch recht kompliziert gebaut waren. Bei den neueren Lampen strebt man im allgemeinen danach, eine möglichst einfache und sichere Konstruktion anzuwenden. Dabei läßt man den Anker des Elektromagneten nicht direkt die eine Kohle bewegen, sondern man richtet es vielmehr so ein, daß der Anker bei seiner Bewegung ein Räderwerk entweder arretiert oder in Bewegung setzt und erst durch dieses Räderwerk läßt man die Kohle bewegen. Als ein erstes Beispiel

Fig. 410.



dieser Art Lampen kann die in Fig. 410 schematisch gezeichnete Lampe von Hefner-Alteneck dienen, die noch vielfach, insbesondere in Laboratorien im Gebrauch ist. Bei jeder elektrischen Lampe hat man nach dem Gesagten zwischen der elektrischen und der mechanischen Regulierung zu unterscheiden. Die elektrische Regulierung besteht hier, wie erwähnt, in einem Elektromagneten E, der einen Anker A anziehen kann. Mit diesem Anker ist ein Hebel fest verbunden, dessen entferntes Ende in ein Zahnrad eingreift. Durch die Schraube s wird eine Feder gespannt, die mit dem Anker fest verbunden ist, und welche der Anziehung des Elektromagneten entgegenwirkt.

Die mechanische Regulierung wird durch drei Räder und zwei Zahnstangen bewirkt. Die beiden Kohlen sind an den Zahnstangen befestigt, welche in die Zähne des obersten Rades eingreifen, und zwar der obere Kohlenhalter am Umfang des großen Rades, der untere am Umfang eines halb so großen, auf derselben Achse befindlichen. Durch das zweite und dritte Rad wird die Bewegung auf das kleine unterste Rad übertragen, in welches der Hebel p eingreifen kann. Das Räderwerk wird durch eine Uhrfeder in Gang gesetzt. Dadurch laufen zunächst die beiden Kohlen zusammen, bis zur Berührung. Nun beginnt der Strom zu fließen und zwar geht er von der Klemme + durch den Elektromagneten, durch das Gehäuse des Apparates, in die obere Kohle, von dieser in die untere und von dort (in der punktierten Linie) zur Klemme — und zur Maschine zurück. Der starke Strom macht nun E magnetisch, dadurch wird der Anker A angezogen und der Hebel p greift in das kleine Rad ein, welches dadurch etwas zurückgedreht wird und damit die Kohlen auseinander bringt. In dem Moment entsteht der Lichtbogen. Zu gleicher Zeit findet aber jetzt ein direkter Kontakt an der Stelle h statt, so daß der Strom nicht mehr um den Elektromagneten E geht. Der Anker wird also losgelassen, der Hebel p geht aus dem kleinen Rad heraus und die Kohlen bewegen sich wieder gegeneinander. Dadurch wird A wieder angezogen und so geht das Spiel fort, durch welches der Lichtbogen stets auf gleicher Länge erhalten wird.

Die äußere Ansicht einer solchen Lampe mit einem versilberten Hohlspiegel, welcher das Licht konzentriert zurückwirft, zeigt Fig. 411. Diese Lampen werden viel in Laboratorien und zu Zwecken der Projektion von Bildern benutzt.

Man erkennt aus dieser Beschreibung der Hefnerschen Lampe, daß außer der elektrischen Einrichtung noch eine feine, rein mechanische Einrichtung dazu gehört, um eine Lampe zu vollkommener Regulierung zu bringen. Das Haupterfordernis ist eben, daß die Bewegung der Kohlen jeder kleinsten Stromschwankung unmittelbar folgt und daß diese Bewegung keine ruckweise, sondern eine ganz allmähliche ist. Natürlicherweise läßt sich sowohl in Bezug auf die rein mechanische Ausführung und Anordnung der einzelnen Teile, als auch in Bezug auf die elektrische Einrichtung des Regulators vieles ändern, und in der Tat ist eine Unzahl von Lampen konstruiert worden, welche in der einen oder anderen Hinsicht wesentliche oder unwesentliche Veränderungen zeigen.

Fig. 411.

Aber die eben beschriebene elektrische Regulierung ist nur in speziellen Fällen zu gebrauchen. Eine jede solche Lampe funktioniert nur brauchbar, wenn sie allein im Schließungskreis einer Maschine sich befindet, wenn nicht noch andere Lampen in demselben Stromkreis brennen. Die Regulierung dieser Lampen wird ja dadurch besorgt, daß bei einer Schwächung des Stromes die Kohlen einander genähert werden, bei Verstärkung des Stromes sie voneinander getrennt werden. Woher diese Schwächung oder Verstärkung des Stromes rührt, das ist gleichgültig. Die Schwächung kann herrühren von den Vorgängen in der Lampe selbst, vom Abbrennen der Kohlen u. s. w., sie kann aber auch von außen kommen, wenn der Strom, der in die Lampe gesendet wird, nicht ganz konstant ist. Wenn nun zwei oder mehrere Lampen hintereinander in einem Stromkreise sich befinden, so kann man sofort einsehen, daß diese Regulierung dann illusorisch wird. Nehmen wir an, es brennen bloß zwei Lampen hintereinander in demselben Stromkreis. Die erste brenne gerade normal, bei der zweiten seien die Kohlen zu weit auseinander. Dann wird die Regulierung die Kohlen der zweiten Lampe einander nähern, also den gesamten Strom verstärken. Infolge dieser Verstärkung muß nun aber auch die Regulierung der ersten Lampe in Tätigkeit kommen und deren Kohlen auseinander bringen. Jetzt brennt also die zweite Lampe vielleicht normal, während die erste schlecht brennt. Noch schlimmer ist es, wenn mehr als zwei Lampen in einen Stromkreis eingeschaltet werden sollen. Was der einen Lampe nutzt, das schadet der anderen. Es findet ein ewiger Kampf ums Dasein zwischen allen Lampen statt.

Man kann diese Schwierigkeiten aber durch eine einfache Schaltungsänderung vermindern. Bei der oben beschriebenen elektrischen Lampe nämlich war die elektrische Regulierungsvorrichtung direkt in den Hauptstromkreis eingeschaltet. Dadurch übernahm sie wohl die Regulierung des Kohlenabstandes, wenn dieser sich änderte, aber sie wurde auch beeinflußt durch alle anderen Vorgänge im Stromkreis

außerhalb der eigenen Lampe und deswegen war sie für mehrere Lampen in demselben Stromkreis direkt schädlich und unbrauchbar.

Eine solche Regulierung ist also bloß für eine Lampe zu brauchen, die allein in einem Stromkreis brennt, also für eine Lampe für Einzellicht. Das einfache Schema des Stromes, wie er in einer solchen Lampe für Einzellicht fließt, ist in Fig. 412 gezeichnet.

Es geht darin der Strom von der Maschine M durch die Regulierungsvorrichtung R und durch die Kohlen K K zur Maschine zurück. Kohlen und Regulierungsapparat sind hintereinander geschaltet. Jede Veränderung im Widerstand des Lichtbogens und jede sonstige Stromschwankung setzt die Regulierungsvorrichtung in gleichmäßige Tätigkeit.

Wenn man dagegen, und dies ist das neue Prinzip, den Strom, wenn er in eine Lampe eintritt, teilt, so daß die Regulierungsvorrichtung im

Fig. 412.

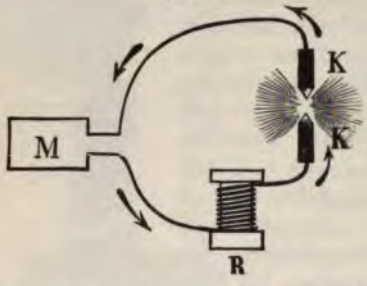
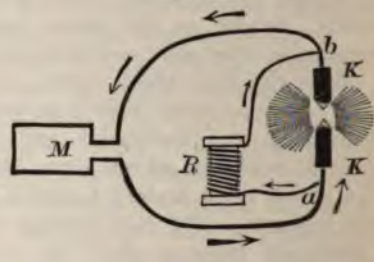


Fig. 413.



Nebenschluß, nicht im Hauptstromkreis liegt, dann ergeben sich nach den Gesetzen der Stromverteilung weiti günstigere Verhältnisse. Das Schema für eine solche Stromverteilung ist n Fig. 413 angegeben.

Hier geht auch wieder der Strom von der Maschine M aus bis zu den Punkten a und b; dort aber teilt er sich und geht einerseits durch die Kohlen K K, andererseits durch die Regulierungsvorrichtung. Die Stromstärken in beiden Zweigen verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände, wie wir aus S. 69 wissen. Je größer daher der Widerstand in dem Lichtbogen wird, desto größer wird die Stromstärke in dem Regulierungszweig, desto kräftiger kann die Regulierung wirken und die Kohlen aneinander bringen. Wie groß dagegen der Strom in Wirklichkeit ist, der in die beiden Zweige eintritt, darauf kommt es viel weniger an. Die Regulierung kommt hauptsächlich in Tätigkeit durch die Vorgänge in der eigenen Lampe. Stromschwankungen von außen ändern die Stromstärken in den beiden Zweigen in gleichem Verhältnis, beeinflussen daher die Regulierung in viel geringerem Maße als bei der früheren Schaltung. Allerdings ist das nur bei ganz geringen äußeren Stromschwankungen der Fall, wie man ja sofort durch die Betrachtung des Grenzfalles sehen kann, daß, wenn der Strom außerhalb sehr schwach wird, natürlich auch die Regulierung sehr schwach werden muß. Die Praxis hat es aber hauptsächlich mit kleinen Stromschwankungen zu tun.

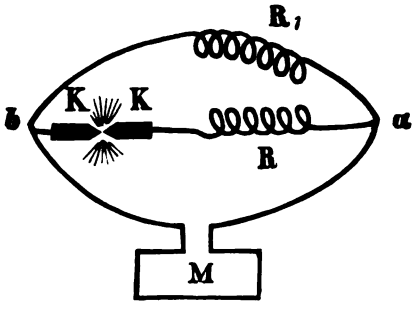
Der Elektromagnet muß bei Lampen dieser Art, die man Nebenschlußlampen nennt, mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes umwickelt sein, damit nur ein ganz geringer Teil des Stromes bei

normaler Lichtbogenlänge durch die Regulierungsvorrichtung hindurchgehe, während der Hauptstrom zur Lichterzeugung benutzt wird.

Indes auch bei diesen Nebenschlußlampen ist der Einfluß äußerer Stromschwankungen zwar geschwächt, aber nicht ganz vermieden; vielmehr wirken äußere Stromschwankungen auch hier störend auf die Regulierung, wenn auch in geringerem Grade. Wird z. B. der Strom, der in die Lampe kommt, aus irgendwelchen äußeren Ursachen zu stark, so werden auch die beiden Zweigströme stark, das Licht brennt also stärker als normal, aber auch der Regulierungsmagnet ist stärker als im normalen Zustand. Je stärker der Magnet ist, desto mehr zieht er die Kohlen aneinander (da ja Verstärkung des Stromes im Regulierungszweig die Kohlen aneinander bringen muß). Es wird also dann das zu starke Licht noch stärker, und umgekehrt ist es bei zu schwachem Licht. Es werden also äußere Stromschwankungen durch die Regulierung nicht ausgeglichen. Auch hierbei schädigen die Stromschwankungen im äußeren Stromkreis noch jede einzelne Lampe, wenn auch in viel geringerem Maße als bei den Lampen, welche die Regulierung nicht im Nebenschluß haben.

Eine vollkommene gegenseitige Unabhängigkeit aber vieler Lampen, die in einen Stromkreis hintereinander eingeschaltet sind, wurde erst erreicht durch eine Einrichtung, die von Hefner-Alteneck angegeben wurde, die das aufgestellte Problem wirklich löste und die zum erstenmal in der Tat ein vorzügliches Brennen mehrerer Lampen in einem Stromkreise gestattete. Dies wurde erreicht durch eine besondere Schaltung und Regulierung. Die Lampen, welche diese Einrichtung besitzen, nennt man Differentiallampen. Sie wurden zuerst von Siemens & Halske bei ihren vielen Beleuchtungsanlagen eingeführt.

Fig. 414.



Auch bei der Differentiallampe wird der Strom, der von der Maschine kommt, verzweigt. In dem einen Zweig befinden sich die Kohlen, in dem anderen eine Regulierungsvorrichtung. Die wesentliche Veränderung ist aber die, daß auch in dem ersten Zweig, in welchem sich die Kohlen befinden, eine Regulierungsvorrichtung angebracht ist, und zwar so, daß sie der anderen entgegenwirkt. Durch das Schema in Fig. 414 wird die Wirkung der Differentiallampe deutlich werden.

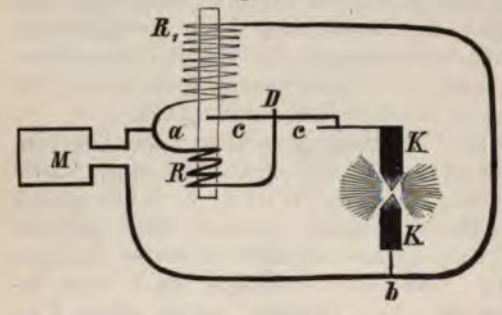
Von der Maschine M geht der Strom nach den beiden Verzweigungspunkten a und b und durchfließt den Zweig a R_1 b mit der Regulierungsvorrichtung R_1 und den Zweig a R K K b mit der Regulierungsvorrichtung R und den Kohlen K K zu gleicher Zeit. Die Stromstärken in den beiden Zweigen verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände. Die Regulierungen sind nun so eingerichtet, daß eine Verstärkung des Stromes in R_1 die Kohlen näher aneinander bringt, die Verstärkung des Stromes R dagegen die Kohlen auseinander zieht. Wird also der Lichtbogen zu groß, also sein Widerstand zu groß, so wird in R_1 die Stromstärke größer und

dadurch werden die Kohlen näher aneinander gebracht. Wird dagegen der Lichtbogen zu klein, also die Stromstärke in R größer, so werden die Kohlen auseinander gezogen, so daß der Lichtbogen wieder die normale Länge bekommt.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis wird bei dieser Regulierung nicht beeinflußt. Denn die Kohlen stellen sich immer auf normalen Widerstand ein. Durch die Vorgänge in einer Lampe werden also die anderen nicht in Mitleidenschaft gezogen. Der äußere Stromkreis ist daher unabhängig von den Vorgängen in der Lampe und umgekehrt.

Die Art und Weise nun, wie Hefner-Alteneck die beiden Regulierungen anwendete, ist am einfachsten aus Fig. 415 zu ersehen. Die Regulierungsvorrichtung besteht aus zwei Solenoiden R und R_1, in welche ein Eisenzylinder eintaucht. Das obere Solenoid R_1, welches im Nebenschluß zu den Kohlen liegt, besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes, das untere, welches im Hauptstrom liegt, aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes. Die untere Kohle steht fest, während die obere durch einen Hebelarm c c, der sich um D drehen kann, an dem Eisenzylinder befestigt ist. Wird der Strom im Solenoid R_1 stärker, so wird der Eisenstab in dieses hineingezogen und dadurch die obere Kohle gesenkt. Wird der Strom in R stärker, so wird der Eisenzylinder in dieses hineingezogen und die Kohle K hebt sich. Auf diese Weise ist die Differentialwirkung der beiden Spulen sehr einfach hergestellt.

Fig. 415.



So kann man also mit Hilfe des Differentialprinzips eine Reihe von Lampen hintereinander in den Stromkreis einschalten, ohne daß sie ihre Regulierung gegenseitig schädigen.

Wir können die Unterschiede der drei Lampengattungen, der Hauptstrom-, Nebenschluß- und Differentiallampen leicht in folgender Weise uns klar machen.

Wenn der Anker des Elektromagneten einer Hauptstromlampe durch die Feder einmal in bestimmten Abstand eingestellt ist, so bewegt er sich so lange nicht, als die Stromstärke, die in den Windungen des Magneten, also auch durch die Kohlen fließt, konstant bleibt. Wird dagegen diese Stromstärke stärker oder schwächer, so reguliert der Elektromagnet, er sucht also immer die Stromstärke konstant zu halten. Eine Hauptstromlampe reguliert auf konstante Stromstärke. Da nun aber, wenn mehrere Lampen vorhanden sind, wohl die Stromstärke in allen konstant sein kann, während doch die Abstände der Kohlen, die Widerstände, sich in den einzelnen Lampen ändern, so erklärt sich, warum die Hauptstromlampen nur einzeln gut funktionieren können.

Bei den Nebenschlußlampen wird der Anker des Mag-

neten so lange nicht bewegt, als der Strom im Nebenschluß konstant bleibt, dagegen wird er bewegt, wenn der Strom im Nebenschluß größer oder kleiner wird. Da nun der Nebenschluß (die Wickelung des Regulierungsmagneten) unveränderlichen Widerstand hat, so hängt die Stromstärke im Nebenschluß nur davon ab, wie groß die Spannungsdifferenz an den Anlegepunkten des Nebenschlusses ist. Da er nun immer zu den Kohlen parallel geschaltet wird, so erkennt man, daß die Lampe nicht reguliert, wenn die Spannung an den Kohlen denselben Wert behält, und daß sie reguliert, wenn diese Spannung sich ändert. Eine Nebenschlußlampe reguliert also auf konstante Spannung. Da nun die Spannungsdifferenz zwischen den Kohlen gleich dem Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand ist, so sieht man, daß auch dabei mehrere Lampen hintereinander sich noch stören müssen. Wird der Widerstand in einer Lampe zu groß, also ihr Strom zu klein, so wird der Strom auch in den anderen Lampen zu klein, und daher wird deren Widerstand durch Auseinanderschieben der Kohlen zu groß. Zwei solche Lampen, hintereinander geschaltet, brennen also dann beide zu dunkel oder zu hell. Wenn dagegen die Lampen einzeln parallel geschaltet werden und man die Spannung an den Endpunkten der Parallelleitungen, wie es jetzt immer geschieht, konstant hält, so brennen die Lampen vortrefflich, und auch zwei solche Lampen hintereinander regulieren sich noch gut ein, wenn ihre Federn richtig für die Stromstärke eingestellt sind.

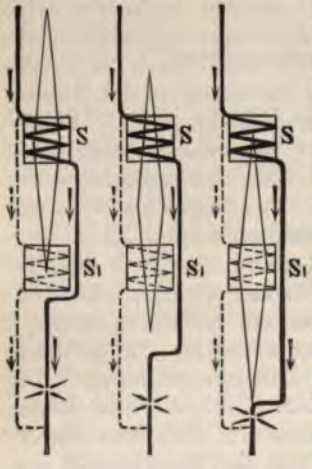
Endlich bei den Differentiallampen wird durch die Regulierung bewirkt, daß das Verhältnis zwischen der Spannung (in der Nebenspule) und der Stromstärke (in der Hauptspule) dasselbe bleibt. Dieses Verhältnis ist aber der Widerstand der Lampe. Eine solche Lampe bewirkt also, daß der Widerstand zwischen den Kohlen immer derselbe ist. Die Differentiallampe reguliert auf konstanten Widerstand. Daher behalten eine Reihe von Differentiallampen, die hintereinander geschaltet sind, immer denselben Widerstand, also auch dieselbe Stromstärke, wenn nicht die Maschine, die die Ströme erzeugt, schwankt. Daher eignen sie sich besonders vor allen Lampen zur Serienschaltung.

Alle bisher konstruierten Lampen sind nun entweder Hauptstromlampen oder Nebenschlußlampen oder endlich Differentiallampen. Am häufigsten werden die Differentiallampen benutzt, die die beste Regulierung besitzen. Die Konstruktionen der einzelnen Fabriken unterscheiden sich in Bezug auf den elektrischen Teil der Regulierung nur wenig, dagegen erheblich in Bezug auf den mechanischen Teil.

Was zunächst den elektrischen Teil betrifft, so haben wir schon die zwei hauptsächlichsten Methoden der Anwendung des Stromes zur Regulierung gesehen. Bei der oben beschriebenen Einzellampe von Siemens war es ein Elektromagnet, welcher einen Anker anzog und so die Regulierung besorgte, bei der Differentiallampe von Hefner waren es Solenoide, welche weiches Eisen in sich hineinziehen, wenn sie von einem Strome durchflossen sind. Man braucht dann nur den einen Kohlenhalter aus Eisen zu machen und ihn in einer Drahtspule schweben zu lassen, dann wird durch die magnetisierende Kraft der Spule dieses Eisen bald mehr, bald weniger in die Spule hineingezogen, je nach der Stromstärke, und dadurch der Kohlenabstand selbsttätig reguliert.

Eine zweckmäßige Verbesserung bei der Anwendung von Solenoiden zur elektrischen Regulierung hat Krizik erfunden. Die Hefnersche Differentialregulierung beruht ja auf der Anziehungskraft, welche die beiden Solenoide auf den Eisenzylinder äußern. Die Anziehung zwischen einem Solenoid und einem zylindrischen Eisenkern ist aber eine verschieden starke, je nachdem der Kern weiter oder weniger weit in das Solenoid eintaucht. Die Kraft ist am größten, wenn der Stab so weit in die Spirale hineingezogen ist, daß sein Ende mit der Mitte des Solenoids zusammenfällt. Sie ist geringer, wenn der Stab die Mitte noch nicht erreicht hat oder über sie hinaus ist. Danach ist auch bei den beiden Solenoidspulen der Hefnerschen Lampe die Anziehung derselben auf den Eisenkern eine verschiedene, je nach der Lage des Kerns in denselben; folglich muß auch die Stärke der Regulierung sich ändern, je nachdem der Stab ziemlich weit in die eine der beiden Spulen eintaucht oder wenig. Um eine gleichmäßige Regulierung zu erlangen, muß man noch mechanische Hilfsmittel, Zahnstangen, Räder, Pendel, anwenden. Dagegen erreicht Krizik ohne komplizierten Mechanismus eine gleichmäßige Regulierung dadurch, daß er dem Eisenkern nicht eine zylindrische Form gibt, sondern eine nach beiden Seiten spitz zulaufende. Dadurch wird erzielt, daß die Bewegung des Kerns immer eine gleichmäßige bleibt. Denn an den Stellen, an denen die Kraft der Solenoide auf den Eisenkern am stärksten sein würde, befinden sich jetzt geringere Eisenmassen, so daß das Produkt aus der magnetisierenden Wirkung der Spirale und der Menge des Eisens im Kern immer dasselbe bleibt, und gerade von diesem Produkt hängt die Wirkung des Solenoids auf den Kern ab. In den extremen Lagen wirkt daher bei der Krizikschen Anordnung das Solenoid nur auf die spitzen Enden, während, wenn der Stab in der Mitte einer Spule sich befindet, die Wirkung auf die größte Breite ausgeübt wird. Dadurch ist erreicht, daß die Anziehungskraft fast in der ganzen Länge des Stabes dieselbe bleibt. In Fig. 416 ist ein solcher Eisenstab in drei verschiedenen Lagen innerhalb der beiden Spulen gezeichnet. In jeder Lage des Stabes ist die Kraft der Spulen auf ihn dieselbe.

Fig. 416.



In der ursprünglichen Form war die Krizikssche Lampe (welche von den Siemens-Schuckertwerken konstruiert wird) tatsächlich mit zwei übereinander liegenden Differentialspulen versehen, in welchen der doppelt konische Eisenkern schwebte. Jetzt werden die Lampen, von denen Fig. 417 eine Abbildung gibt, so konstruiert, daß die beiden Differentialspulen S_1 und S_2 nebeneinander stehen und in jeder sich nur ein einfach konischer Eisenkern befindet, dessen spitzes Ende nach oben gerichtet ist. Links in der Figur ist die Spule S_2 aus dünnem Draht, rechts die Spule S_1 mit dickem Draht. Der Eisenkern von S_1 trägt den oberen Kohlenhalter H_1, während der Eisenkern von S_2 mit dem unteren Kohlenhalter H_2 fest verbunden ist. Der untere Kohlenhalter ist unten

rechtwinklig umgebogen, so daß die untere Kohle nach oben gerichtet ist und der oberen gerade gegenübersteht. Die beiden Kohlenhalter sind nun durch eine Schnur J, die über die oben sichtbare Rolle läuft, miteinander verbunden. Dadurch wird bewirkt, daß beide Kohlen sich immer um gleich viel verschieben. Die Kohlenhalter, die sich über die Spulen hinaus verlängern, werden durch Rollen an den Stangen T_1 und T_2 geführt, damit sie sich nicht verdrehen können. Bei zu geringem Abstand der Kohlen ist der Strom in S_1 stark und dadurch wird die obere Kohle gehoben, die untere also gesenkt, der Kohlenabstand also vergrößert. Bei zu großem Kohlenabstand ist der Strom in S_2 stark, die obere Kohle wird gesenkt, die untere dadurch gehoben, der Kohlenabstand also verringert.

Fig. 417.

Wenn mehrere Bogenlampen hintereinander geschaltet werden sollen, so muß noch eine Vorrichtung angebracht sein, um eine Lampe vollkommen aus dem Stromkreis auszuschalten, wenn sie aus irgend einem Grunde, z. B. wenn eine Kohle abbricht, ganz erlischt. Sonst würde nämlich der gesamte Strom durch den anderen Zweig der Zweigleitung gehen, nämlich durch das Solenoid mit den vielen dünnen Drahtwindungen, und diese stark erhitzen und andererseits selbst so geschwächt werden, daß die übrigen Lampen erlöschen. Deswegen wird dem Strom für den Fall des Erlöschens noch ein anderer Weg geboten, als durch die dünne Spirale. Bei der Lampe von Schuckert fließt dieser Zweigstrom, der um S_2 geht, noch um ein Stück weichen Eisens M herum. Dieses wird zwar magnetisch, aber da der Zweigstrom sehr schwach ist, so wird es nicht magnetisch genug, um einen Anker anzuziehen. Erst wenn die Lampe erloschen ist und der ganze Strom durch diesen Zweig geht, wird der Elektromagnet stark genug, den Anker anzuziehen, und der Anker bringt nun einen dicken Draht W (Fig. 417) in Kontakt mit der Hauptstromquelle, so daß der Strom nun hauptsächlich durch diesen dicken Draht geht. Dieser ist zugleich auch noch um den Elektromagneten M gewunden, damit dieser dann stets stark genug bleibt, den Anker angezogen zu erhalten.

Ganz ähnlich sind die selbsttätigen Kontaktvorrichtungen bei anderen Differentiallampen, wenn sie hintereinander geschaltet werden. Durch einen solchen Kontakt wird eine große Sicherheit einer solchen Beleuchtungsanlage bei unzeitigem Erlöschen einer Lampe erzielt.

Die eben beschriebene Lampe zeichnet sich dadurch aus, daß sie außer

den Führungen gar keine mechanische Regulierung hat. Bei anderen Lampen ist außer der elektrischen Regulierung noch immer eine rein mechanische Regulierung vorhanden, die natürlich bei den einzelnen Systemen vielfache Verschiedenheiten aufweist. Es handelt sich bei der mechanischen Regulierung immer darum, die durch die elektrische Regulierung hervorgebrachten Bewegungen eines Ankers oder eines Eisenkerns zunächst auf ein Räderwerk hemmend oder lösend wirken zu lassen, und erst durch dieses von selbst ablaufende Räderwerk die Bewegung der Kohlen hervorzubringen, die dann recht ruhig und stetig vor sich geht.

Fig. 418.

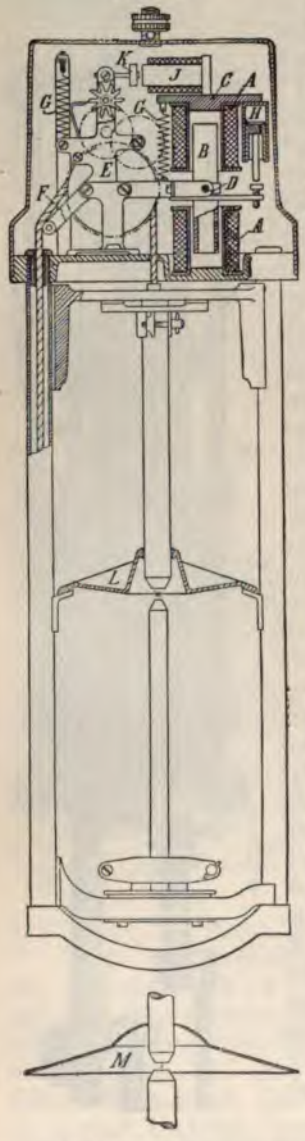
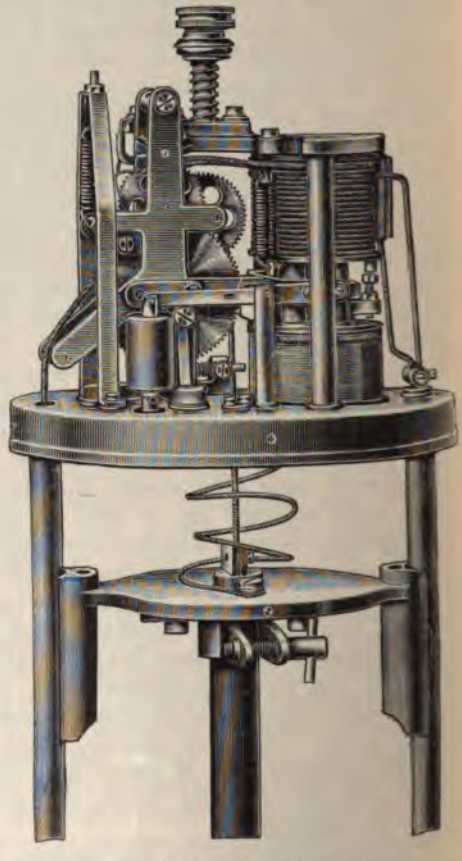


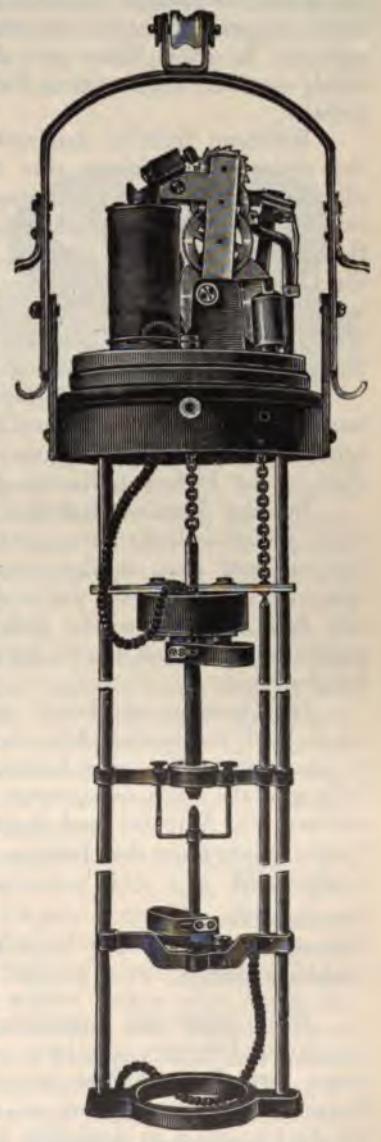
Fig. 419.



Die Seillampe der Siemens-Schuckertwerke, von der Fig. 418 den Mechanismus im Durchschnitt und Fig. 419 in perspektivischer Ansicht zeigt, ist eine Differentiallampe. Der elektrische Teil besteht aus vier Spulen (A A in Fig. 418), von denen die oberen zwei, wie

man aus Fig. 419 sieht, im Hauptstrom, die unteren zwei im Nebenschluß liegen. Ein Eisenkörper B, der wie ein römisches H gebildet ist, hat vier Schenkel, die in die vier Spulenöffnungen hineinreichen. Der ganze Eisenkörper ist in einer Gabel D gelagert, welche bei ihrer Bewegung das Laufwerk arretiert oder losläßt. Über eine mit dem Räderwerk verbundene Scheibe E ist ein Seil F gelegt, das an seinen beiden Enden die beiden Kohlenhalter trägt. Durch das Übergewicht des oberen Kohlenhalters wird das Laufwerk in Bewegung gesetzt, bis die Kohlen zusammentreffen. In diesem Moment geht ein starker Strom durch die Hauptspulen oben, diese ziehen den Eisenkörper in sich hinein und ziehen dadurch die Kohlen auseinander, die nun durch die Differentialregulierung zum langsamen Nachrücken von beiden Seiten gebracht werden. Die Lampen werden, wie Fig. 418 bei L zeigt, mit einem sogenannten Sparer versehen. Ein hohlkegelförmiger, emaillierter Eisenkörper befindet sich dicht über dem Lichtbogen, wodurch der Zutritt der Luft zum Lichtbogen verhindert wird. Infolgedessen brennen die Kohlen langsamer ab und man hat, ohne Nachteil an der Lichtstärke zu merken, einen Minderaufwand von 40 Proz. an Kohlen, gegenüber einem frei brennenden Lichtbogen.

Fig. 420.



Die Fixpunktnebenschlußlampe der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin ist in Fig. 420 abgebildet. Die elektrische Regulierung wird durch einen Elektromagneten hervorgebracht, der seinen Anker anzieht. Man sieht den Elektromagneten, mit dünnem Draht versehen, links in der Figur. Solange die Kohlen sich nicht berühren, fließt der Strom um den Elektromagneten, der Anker wird heruntergezogen. Dadurch wird bewirkt, daß das Räderwerk, das bis dahin festgehalten war, sich loslöst, daß die Räder sich drehen und daß daher die Kohlenhalter sich zu bewegen anfangen. Diese sind nämlich an einer Kette befestigt, welche über eines der Räder gelegt ist. Infolge der Kettenverbindung bleibt bei der Bewegung der Kohlenhalter der Brennpunkt immer an derselben Stelle, also fix, woher der Name der Lampe

genommen ist. Die Kohlen laufen also zusammen. Im Moment, wo sie sich berühren, wird der Elektromagnet stromlos und nun wird durch eine Feder der Anker wieder gehoben, so daß die Kohlen sich trennen und der Lichtbogen sich bildet. Bei weiterem Abbrennen der Kohlen wird die Kraft des Elektromagneten wieder stärker und zieht den Anker wieder tiefer, bis wieder das Rädersystem losgelöst ist und die Kohlen sich wieder nähern. In dieser Weise geht das Spiel fort. Auch eine Differentiallampe wird von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in ähnlicher Weise gebaut.

Während man in den ersten Jahren der weitgehenden Einführung des elektrischen Lichtes eine Anzahl Bogenlampen gewöhnlich für sich allein betrieb, werden heutzutage Bogenlampen und Glühlampen gewöhnlich von derselben Maschine gespeist. In diesem Falle ist die Einrichtung der Dynamomaschinen derartig, daß sie in den Hauptleitungen, von denen die Lampen abgezweigt werden, dauernd dieselbe Spannungsdifferenz hervorbringen (die in der Praxis gewöhnlich 65 oder 110 oder 220 Volt beträgt). In eine solche Glühlichtanlage kann man nun auch ohne weiteres Bogenlampen einführen, indem man diese ebenfalls parallel schaltet.

Wo es sich bei den Beleuchtungsanlagen nur um Bogenlicht allein handelt, da werden zweckmäßig viele Bogenlampen hintereinander geschaltet, weil das Leitungsmaterial dann am billigsten ist. Für diesen Fall ist die Differentiallampe die allein anwendbare.

Bei der Parallelschaltung von Bogenlampen dagegen benutzt man auch Nebenschlußlampen, jetzt jedoch ebenfalls meistens Differentiallampen, und zwar werden, wenn in den Hauptleitungen eine Spannung von 110 Volt herrscht, wie es gewöhnlich bei großen Stadtbeleuchtungen der Fall ist, zwei solche Bogenlampen hintereinander in eine Leitung geschaltet, so daß lauter parallele Gruppen von je zwei Lampen vorhanden sind.

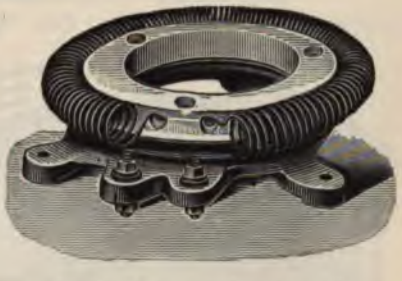
Die Spannungsdifferenz, die an den Enden der Kohlen herrscht, ist je nach der Stromstärke, mit der die Lampen betrieben werden, und je nach der Länge des Lichtbogens etwas verschieden. Folgende Tabelle gibt für einen bestimmten Fall zusammengehörige Werte von Stromstärken (in Ampere) und Spannung an den Klemmen der Lampe (in Volt), wenn man der Lampe die jedesmal passende Länge des Lichtbogens gibt.

Stromstärke . .	3,	6,	9,	12,	15,	20,	30,	40 Ampere.
Klemmenspannung	41,	43,5	44,8	46,	47,	48,	50,	52 Volt.
Lichtbogenlänge .	1,	1,9	2,8	3,5	3,9	4,7	5,4	6 mm.

Wenn daher eine Bogenlampe in einem Zweig brennen soll, der 65 Volt Spannungsdifferenz hat (wie es zuweilen bei Anlagen vorkommt), oder wenn zwei Bogenlampen hintereinander in einen Zweig von 110 Volt Spannung brennen sollen, so muß man immer noch einen Zusatzwiderstand in denselben Kreis einschalten, der die übrige Spannung aufnimmt. Sollen z. B. zwei Lampen hintereinander mit je 12 Ampere brennen und ist die Spannung des Netzes gleich 100 Volt, so verbrauchen die Lampen davon bloß 92 Volt. Man muß daher einen Widerstand so wählen, daß der Spannungsverlust in ihm bei 12 Ampere Stromstärke

gleich 8 Volt ist, d. h. er muß 0,75 Ohm groß sein. Wenn sich der Abstand der Kohlen in einer Lampe und damit der Widerstand ändert, so hat diese Änderung einen geringeren Einfluß auf die Stromstärke, wenn noch ein Zusatzwiderstand vorhanden ist, als wenn keiner vorhanden wäre. Denn der gesamte Widerstand des Lampenzweiges ist dann eben die Summe aus dem konstanten Zusatzwiderstand und dem variablen Lampenwiderstand. Man gibt diesen Zusatzwiderständen eine gefällige Form. So zeigt Fig. 421 eine Konstruktion von Voigt & Häffner. Der kreisförmige Widerstand wird mit seiner Unterlage an der Wand befestigt. Zuweilen bringt man jetzt in ein Netz von 110 Volt Spannung drei Lampen hintereinander ohne Zusatzwiderstand an, wobei wegen der geringeren Spannung, die auf jede kommt, die Länge des Lichtbogens und dadurch auch die Lichtstärke jeder Lampe reduziert werden muß.

Fig. 421.



Die Brenndauer einer Bogenlampe hängt natürlich ab von der Länge und Dicke der Kohlenstäbe, die man in die Lampe einsetzt. Denn infolge der hohen Temperatur des Lichtbogens verbinden sich die Kohlen mit dem Sauerstoff der Luft und brennen allmählich ab. Man kann durchschnittlich rechnen, daß von jeder Kohle zirka 20 mm in der Stunde abbrennen. Für verschiedene Stromstärken nimmt man die Kohlen verschieden dick, und zwar, wie oben erwähnt, die positive Kohle mit doppelt so großem Querschnitt wie die negative. Gewöhnlich werden die Kohlen so lang genommen, daß die Lampe 6 bis 10 Stunden brennt. Man hat aber auch versucht, die Brenndauer der Lampen wesentlich zu vergrößern, und man erreicht das, indem man den Luftzutritt zum Lichtbogen beschränkt. Man schließt nämlich den Lichtbogen in eine besonders enge Glasglocke ein, zu der der Sauerstoff der Atmosphäre nicht hinzu kann. Mit solchen Dauerbrandbogenlampen kann man Brenndauern von über 100 Stunden erreichen.

Wir haben bisher wesentlich von dem Betrieb der Bogenlampen mit Gleichstrom gesprochen. Wie schon erwähnt, läßt sich das Bogenlicht aber ebensogut durch Wechselströme erzeugen. Auch kann man dabei die Regulierung im wesentlichen ebenso gestalten wie bei Gleichströmen. Denn die elektrische Regulierung wird ja immer durch die Anziehung eines Elektromagneten auf seinen Anker oder durch die Einziehung seines Eisenkerns in eine Spule bewirkt. Ein Elektromagnet zieht aber weiches Eisen sowohl mit seinem Nordpol, wie mit seinem Südpol an, weil in dem Eisen immer der entgegengesetzte Pol induziert wird und eine Spule zieht den Eisenkern immer hinein, ob sie nun von dem Strom in der einen oder in der anderen Richtung durchflossen wird. Daher wirken beide Arten der Regulierung auch bei Wechselströmen. Nur muß man dann das Eisen des Elektromagneten wegen der Wirbelströme zerteilen.

In einigen Beziehungen aber findet ein Unterschied im Bogenlicht

statt, wenn es von Wechselströmen und wenn es von Gleichströmen erzeugt wird. Zunächst darin, daß beim Gleichstrom die Hauptmenge des Lichtes von selbst nach unten geworfen wird, weil die obere positive Kohle einen Krater bildet. Bei Wechselströmen muß man dies künstlich erreichen, indem man über dem Lichtbogen eine spiegelnde Fläche, einen Reflektor, anbringt, der das nach oben gestrahlte Licht nach unten wirft.

Die oben beschriebene Seillampe von Siemens & Halske wird auch ohne wesentliche Änderungen für Wechselströme eingerichtet.

Von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin wird als Wechselstrombogenlampe eine Motorlampe konstruiert, von welcher Fig. 422 das Werk zeigt, während Fig. 423 dasselbe mehr schematisch darstellt. Eine runde Aluminiumscheibe A ist drehbar an einer Achse befestigt. Sie dreht sich zwischen den Polschuhen eines Hauptstromelektromagneten H und eines Nebenschlußelektromagneten N, die zu beiden Seiten der Achse angeordnet sind. Die Pole dieser Magnete sind mit Kupferplatten zum Teil bedeckt. Wenn die Wechselströme fließen, so werden sowohl in diesen Kupferflächen, wie in der Aluminiumscheibe Induktionsströme erregt und diese bewirken eine Drehung der beweglichen Scheibe. Mit der Scheibe sind durch Räderübersetzung die Kohlen verbunden. Der Hauptstromelektromagnet bewirkt, daß die Kohlen auseinandergehen, der Nebenschlußelektromagnet, daß sie zusammen gehen. Der Strom wird bei P und P′ eingeführt.

Fig. 422.

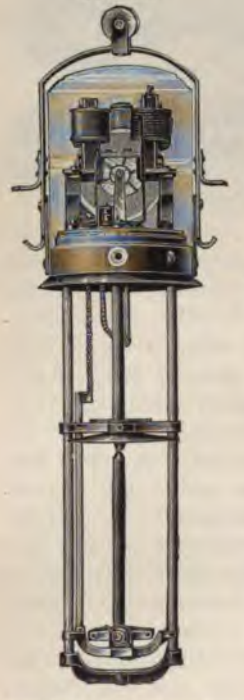
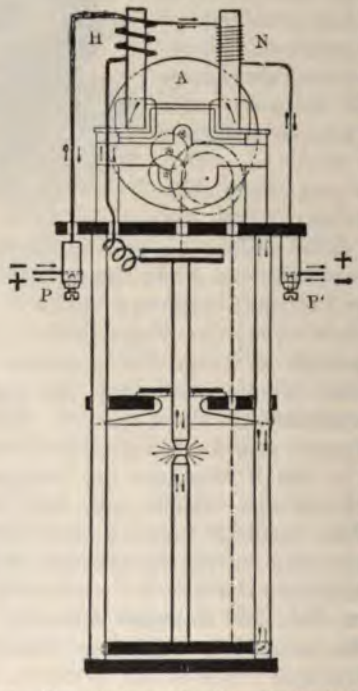


Fig. 423.



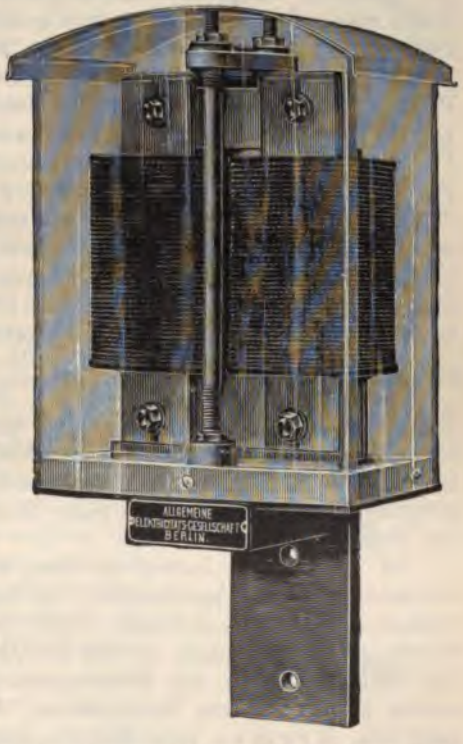
Die Spannung an den Kohlen bei Wechselstromlampen ist, wie schon oben S. 439 angeführt wurde, eine kleinere als bei Gleichstrom. Sie ändert sich auch hier mit der Stromstärke und der Lichtbogenlänge, und es sind in der folgenden Tabelle zusammengehörige Werte von Stromstärke, Spannung und Lichtbogenlänge angegeben, die aber für die verschiedenen Arten des Wechselstromes erhebliche Veränderungen zeigen:

Stromstärke . .	6,	10,	16,	20,	30	Ampere.
Spannung . . .	27,	28,	29,	30,	32	Volt.
Lichtbogenlänge	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	mm.

Selbstverständlich muß daher eine Wechselstromlampe bei gleicher Stromstärke weniger Licht aussenden als eine Gleichstromlampe. Denn die von der Lampe verbrauchte Energie bei Gleichstrom ist ungefähr 45 Volt mal der Stromstärke, bei Wechselstrom aber bloß zirka 30 Volt mal der Stromstärke. Daher kann auch die erzeugte Lichtmenge bei Wechselstrom nur ungefähr $^2/_3$, also zirka 66 Proz. derjenigen sein, die bei gleicher Stromstärke vom Gleichstrom erzeugt wird.

Um mehrere Wechselstromlampen von zirka 30 Volt Spannung hintereinander in einen Stromkreis zu legen, der, wie häufig, 110 Volt Spannung hat, kann man die übrig bleibende Spannung auch wie bei Gleichstrom durch einen Zusatzwiderstand aufnehmen lassen. Aber man hat bei Wechselstromlampen einfache Mittel, um ohne große Verluste sogar auch bloß eine Lampe oder deren zwei in eine Leitung von 110 Volt einzuschalten. Es kommt ja darauf an, der Spannung an den Kohlen den richtigen Wert von etwa 30 Volt zu geben, während die Leiter, an welche die Lampe angelegt ist, etwa 110 Volt Spannung haben. Das kann man bei Wechselströmen dadurch erreichen, daß man in die Leitung der Lampe eine Drosselspule (S. 226) einschaltet. Eine solche ist ja nichts weiter als ein Elektromagnet mit kleinem Widerstand der Bewickelung. Durch den Eisenkern wird die Selbstinduktion der Rolle sehr groß gemacht. Daher entstehen in dieser starke Induktionsströme, welche den vorhandenen Wechselströmen entgegenwirken und diese schwächen. Das Resultat ist dasselbe, als wenn die Spannung an den Enden der Lampe verringert wäre. Diese Verringerung der Spannung ist aber hierbei nicht, wie bei der Benutzung eines Vorschaltwiderstandes, mit einem großen Verlust an Effekt verbunden. Denn verloren geht nur diejenige Arbeit, die für die Joulesche Wärme verbraucht wird, und diese ist gering, da der wirkliche Widerstand der Drosselspule klein ist. Außerdem wird noch Arbeit wegen der Hysteresis des Eisenkernes verbraucht. Aber diese Arbeitsverluste sind viel geringer, als wenn die

Fig. 424.



ganze Spannung bloß durch Widerstand verringert würde. Eine solche Drosselspule der A.E.G. zeigt Fig. 424. Um die Stromstärke für die Lampen auf die richtige Größe zu bringen, muß man hierbei die Selbstinduktion der Drosselspule ändern können, was dadurch geschieht, daß man zwischen den Eisenflächen des Elektromagneten (oben oder unten) Luftzwischenräume von größerer oder geringerer Dicke durch Einlegen von Preßspanscheiben erzeugt.

Ein zweites Mittel, um Wechselstrombogenlampen in ein Leitungsnetz von beliebiger Spannung einzuschalten, besteht darin, daß man einen kleinen Transformator anwendet, dessen primäre Spule die große Spannung (110 Volt) aufnimmt und dessen sekundäre Spule die kleine Spannung (30 oder bei 2 Lampen 60 Volt) liefert. Entsprechendes gilt natürlich für andere Leitungsspannungen. Der Vorteil, den man durch eine solche Transformation erzielt, wird aus folgender Berechnung klar werden. Es soll eine einzelne Bogenlampe für 12 Ampere an ein Leitungsnetz für Wechselstrom von 110 Volt angeschlossen werden. Die Bogenlampe braucht für sich einen Effekt von zirka $30 \times 12 = 360$ Watt. In der ganzen Leitung würden aber bei 12 Ampere Stromstärke $110 \times 12 = 1320$ Watt vorhanden sein, folglich müßte man einen Zusatzwiderstand anwenden, der 960 Watt konsumiert, und diese würden dauernd nutzlos verloren gehen. Wendet man aber einen Transformator an, so würde an dessen sekundären Klemmen eine Spannung prinzipiell von 30 Volt, in Wirklichkeit aber von etwa 40 Volt herrschen müssen. Da die Spannung von 110 Volt auf 40 Volt heruntertransformiert wird, so braucht in der primären Wickelung des Transformators nur die Stromstärke $12 \times \frac{40}{110} = 4{,}4$ Ampere zu herrschen. Folglich ist der Effekt in der primären Wickelung bloß $4{,}4 \times 110 = 484$ Watt, es ist also ein sehr viel kleinerer Effektverlust vorhanden. Solche kleine Transformatoren werden von den verschiedenen Fabriken bei ihren Wechselstromanlagen benutzt. Eine ganz ähnliche Rechnung läßt sich auch für die Drosselspulen ausführen.

In den letzten Jahren ist man auf eine Verbesserung der Bogenlampenkohlen zurückgekommen, die bereits im Beginne der elektrischen Periode (Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts) versucht wurde, die aber damals, da das korrekte Funktionieren der Lampen und die Gleichmäßigkeit des Kohlenmaterials noch nicht so durchstudiert waren, keinen weiteren Erfolg hatte. Man stellt nämlich nach dem Vorgang von Bremer jetzt Bogenlampen mit farbigem Licht her, indem man statt der gewöhnlichen Kohlenstäbe in ihnen sogenannte Effektkohlen brennen läßt. Das sind gewöhnliche Kohlenstäbe, welche aber mit bestimmten Substanzen, Fluorsalzen, Baryumoxyd, Strontiumoxyd u. s. w. (die Masse ist Geheimnis der einzelnen Fabriken) in solchen Mengen imprägniert sind, daß in dem Lichtbogen einer solchen Lampe nicht bloß die weißglühende Kohle Licht aussendet, sondern daß auch die Dämpfe der imprägnierten Substanzen strahlen. Diese Metalldämpfe leuchten je nach ihrer Natur in verschiedenen Farben. Man kann dadurch gelbes, rotes oder milchweißes Licht erhalten. Und diese Färbung hat nicht bloß den Vorteil, daß sie das Licht der Bogenlampe, das

an sich wegen seines Reichtums an blauen Strahlen kalt erscheint, bedeutend wärmer macht, sondern sie hat auch noch den weiteren Vorteil, daß sie die Helligkeit des Lichtes bei gleicher Stromstärke bedeutend steigert. Gelb brennende Lampen haben etwa doppelt, rot und milchweiß brennende Lampen etwa $1\frac{1}{2}$ mal so große Helligkeit, bei gleichem Energieaufwand, wie die gewöhnlichen Bogenlampen. Diese Erhöhung der Ökonomie kommt daher, daß diese Salze wesentlich nur sichtbare Strahlen aussenden, während in dem Lichtbogen der weißglühenden Kohlen auch sehr viele Strahlen enthalten sind, die unser Auge nicht affizieren, also nicht sichtbar sind und daher in Bezug auf die Helligkeit nicht zählen. Zur Erhöhung des Glanzes dieser Effektbeleuchtung werden die Glocken für diese Lampen gewöhnlich sehr klein gewählt, wodurch der Eindruck größerer Helligkeit erzielt wird.

Fig. 425.

Die mit solchen Kohlen ausgerüsteten Lampen nennt man Flammenbogenlampen. Um die Beleuchtung nach unten dabei noch intensiver zu machen, werden diese Lampen zum Teil so konstruiert, daß die beiden Kohlen nicht übereinander stehen, sondern schräg gegeneinander laufen. Fig. 425 zeigt das Innere einer solchen und zwar einer Wechselstromlampe der A.E.G., deren Mechanismus der der oben beschriebenen Motorlampe ist. Bei den Lampen mit schräg stehenden Kohlen wird durch die sich drehende Scheibe zunächst eine Führungsstange vertikal auf und ab bewegt, und diese trägt ein Querstück mit den beiden schräg gegeneinander gerichteten Kohlen, welche bei der Aufwärtsbewegung der Stange den Lichtbogen zwischen sich entstehen lassen und dann langsam gegeneinander rücken.

Während man elektrisches Einzellicht bis zu einer Stärke von 50 000 bis 70 000 Normalkerzen und noch mehr erzeugt und angewendet hat, kann man andererseits Bogenlicht von 300 Normalkerzen und weniger mit den gewöhnlichen Lampen erzeugen. Als mittlere Zahl kann man annehmen, daß eine Bogenlampe bei Gleichstrom für jedes Ampere, das sie verbraucht, etwa 100 Normalkerzen Lichtstärke gibt. Da nun eine solche Lampe an ihren Klemmen ungefähr 40 bis 50 Volt Spannung braucht, im Mittel 45 Volt, so folgt, daß man in einer Lampe für etwa 45 Watt 100 Kerzen Stärke erhält. Dasselbe gilt für Wechselstrom. Abzüglich der Verluste in den Zuleitungen kann man also durchschnittlich pro Pferdekraft (736 Watt) ein Licht von etwa 1200 Normalkerzen Stärke erhalten. Die sehr starken Einzellichter sind selbstverständlich nur für besondere Zwecke anwendbar. Auf Leuchttürmen insbesondere werden

sie seit langer Zeit angewendet. Die meisten großen Schiffe sind mit starkem elektrischen Bogenlicht versehen worden und mit Einrichtungen, durch welche dieses Licht nach beliebigen Richtungen hin reflektiert werden kann. Solche Marinereflektoren sind besonders von der Firma Schuckert mit vorzüglichen Leistungen ausgeführt worden. Für praktische Bedürfnisse, zur Beleuchtung von Straßen, Plätzen, großen Räumlichkeiten, wie Bahnhöfen, großen Fabriken, Gärten u. s. w., ist jedoch eine Verteilung des Lichtes auf mehrere Punkte erforderlich.

So ausgezeichnete Eigenschaften das Bogenlicht auch hat, so fehlte ihm doch bisher eine Verwendbarkeit. Für Straßen, Plätze, große Räume war es bequem zu benutzen, aber für kleine Räumlichkeiten, Gänge, Zimmer u. s. w. war es bisher nicht zur Anwendung gelangt. Und das lag daran, daß eine Regulierung für kleine Helligkeiten von 100 bis 200 Kerzen erstens zu große Dimensionen brauchte und zweitens unsicher war. Dem Bedürfnis nach einer für derartige Zwecke geeigneten Bogenlampe ist aber von den Siemens-Schuckertwerken vor kurzem durch eine besondere Lampe, die Liliputbogenlampe, abgeholfen worden. Die äußere Form dieser Lampe ist, mit und ohne Reflektor, durch Fig. 426 und 427 dargestellt. Die Höhe der Lampe beträgt nur 31 cm, ihr Durchmesser 6, bei der Glocke 8 cm. Die Lampen brauchen 80 Volt Spannung und werden für 1, 2 und 3 Ampere Stromstärke konstruiert, wobei sie mindestens 110, 170 und 335 Hefnerkerzen liefern. Der Mechanismus enthält kein Laufwerk, sondern die Kohlen werden durch magnetische Wirkung nur geklemmt und dadurch in ihrer Bewegung reguliert. In Fig. 428 ist das Innere dieser Lampen dargestellt. Solange kein Strom durch die Lampe geht, sitzt die Klemmplatte m auf der Führungsplatte k auf. Die obere Kohle ist daher frei beweglich und fällt auf die untere Kohle. Wird Strom in die Lampe gesendet, so zieht die Spule s den Anker a und damit auch die Klemmplatte m an. Diese stellt sich schräg, klemmt die obere Kohle fest und diese wird daher mit dem Anker gehoben. Der Lichtbogen bildet sich. Brennen die Kohlen allmählich ab, so wird der Lampenstrom schwächer, der Anker a wird allmählich losgelassen, die Klemmplatte setzt sich auf die Platte k auf und daher kann die obere Kohle wieder rücken, bis sie bei richtiger Stromstärke wieder geklemmt wird. Das Sinken der Kohle wird dadurch verlangsamt, daß sie zugleich den Kolben einer Luftpumpe z in Bewegung setzt. Dadurch geht das Spiel einfach, aber sehr exakt fort.

Fig. 426.

Fig. 427.

Wegen ihrer Kleinheit und bedeutenden Helligkeit eignen sich die Liliputlampen insbesondere für den Gebrauch in Häusern. Sie werden daher auf Wandarmen oder Lüstern montiert, ja sogar als Stehlampen

mit Anschlußschnur lassen sie sich, wie Fig. 429 zeigt, verwenden. Ähnliche kleine Lampen werden auch von anderen Firmen hergestellt.

Die großen Vorzüge, die das elektrische Licht vor dem Gaslicht hat, brauchen in der heutigen Zeit nur noch kurz erwähnt zu werden. Vor allen Dingen ist die Gefahrlosigkeit des elektrischen Lichtes hervorzuheben, welche zwar keine ganz absolute, aber jedenfalls eine viel größere als die des Gaslichtes ist. Dann ist die große Leichtigkeit zu erwähnen, mit welcher man Helligkeiten durch das elektrische Licht erzeugen kann, die man auf andere Weise gar nicht erreichen kann. Dazu kommt die Bequemlichkeit, mit der man jede Lampe sofort durch Öffnen des Stromes von irgend einer Stelle aus verlöschen und wieder durch Schließen entzünden kann. In Bezug auf Glanz und Weiße ähnelt das elektrische Bogenlicht am meisten dem Tageslicht, und die Effektkohlen erlauben ihm, nach Wunsch dem Auge angenehme Färbungen zu geben. Endlich besitzt das elektrische Licht den großen Vorzug, namentlich für große Räume, in denen sich viele Menschen aufhalten, daß es die Luft absolut nicht verdirbt, während das Gaslicht bekanntlich die Luft mit schädlichen Gasen erfüllt und außerdem nicht nur Licht, sondern auch in hohem Grade Wärme erzeugt, was oft für große Räumlichkeiten als ein Nachteil bezeichnet werden muß. Zuweilen ist es allerdings auch von Vorteil, da es Heizkosten erspart. Zur Erzeugung glänzender Beleuchtungen ist das elektrische Bogenlicht jetzt unbedingt als das vorzüglichste Mittel anerkannt.

Fig. 428.

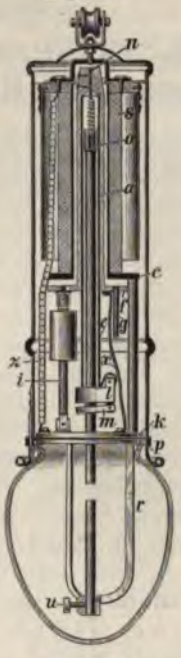


Fig. 429.

6. Kapitel.

Das elektrische Glühlicht und die elektrischen Koch- und Heizapparate.

Während das elektrische Bogenlicht seine unleugbaren Vorzüge bei der glänzenden Beleuchtung von Straßen, Plätzen, großen Sälen und ausgedehnten Räumen besitzt, ist es nicht anwendbar für die Beleuchtung von Häusern und Zimmern, in denen gewöhnlich nicht sehr starke Lichtquellen verlangt werden, sondern im Gegenteil Lichtquellen von mäßiger Stärke, aber in sehr weitgehender Verteilung und mit allen den Bequemlichkeiten im Privatgebrauch, wie sie das Gaslicht längst besitzt.

Hier war es notwendig, ein anderes Prinzip technisch anzuwenden, und dieses angewendet und mit Energie praktisch durchgearbeitet zu haben, ist das ungeschmälerte Verdienst von Edison. Wenn die Idee des elektrischen Glühlichts auch schon von anderen vor Edison erfaßt und teilweise ausgeführt war, so waren doch diese Versuche ohne praktischen Erfolg im großen geblieben. Erst die unermüdlichen Bemühungen Edisons hatten den durchschlagenden und bleibenden Erfolg, auf elektrischem Wege ein Licht zu schaffen, welches eine Teilung fast bis ins Unendliche gestattet, welches beliebig kleine Lichtstärken an beliebig vielen Punkten hervorzubringen erlaubt.

Das elektrische Glühlicht beruht darauf, daß ein von einem Strom durchflossener Körper nach dem Jouleschen Gesetz erhitzt und zum Leuchten gebracht wird. Auf derselben Grundlage, der Jouleschen Wärme, beruhte auch das Bogenlicht. Während aber bei dem Bogenlicht es die trennende Luftschicht zwischen den beiden Kohlen ist, welche vom Strom durchflossen wird, wodurch die Kohlen sowohl, wie die mit Kohlenteilchen versetzte Luftschicht ins Leuchten kommen, wird das elektrische Glühlicht erzeugt durch die Erwärmung eines vollständigen Leiters durch den elektrischen Strom.

Ein jeder Leiter wird, wenn ein elektrischer Strom durch ihn fließt, nach dem Jouleschen Gesetz erwärmt und die in ihm erzeugte Wärmemenge wächst mit dem Quadrat der Stärke des durchgehenden Stromes und mit dem Widerstand des Leiters. Bei gleicher Stromstärke ist also die Erwärmung eines Leiters um so größer, je größer der Widerstand desselben ist. Ist die entwickelte Wärmemenge groß genug, so kommt der Leiter in helles Glühen, und wenn er schmelzbar ist, so wird er durch den elektrischen Strom geschmolzen. Diese Tatsachen waren lange bekannt und schon lange hatte man versucht, dünne Metalldrähte, insbesondere Platindrähte, die zum Glühen gebracht waren, zur Beleuchtung zu verwenden. Indes war bei Metallen eben die Gefahr des Schmelzens eine sehr große. Wurde der Strom zu stark, so wurde der glühende Platindraht weggeschmolzen und die Beleuchtung hörte auf. Es bot sich daher

als bestes Material für solche Glühlichter die Kohle dar, welche bekanntlich noch auf keine Weise, durch keine noch so hoch gesteigerte Temperatur zum Schmelzen gebracht werden konnte. Bei elektrisch glühender Kohle war also die Gefahr des Schmelzens ausgeschlossen. Und in der Tat wendete sich Edison, nachdem er eine Reihe der am schwersten schmelzbaren Metalle erfolglos probiert hatte, der Kohle zu, um sie elektrisch glühend zu machen und dadurch zur Beleuchtung zu verwenden.

Aber glühende Kohle verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft, sie verbrennt rasch, und es ist deshalb eine notwendige Forderung, wenn man glühende Kohle zur Beleuchtung benutzen will, sorgfältig den Sauerstoff der Luft von ihr abzuhalten. Man muß also die Kohle in einen luftleeren Raum einschließen, und das erreicht man, indem man sie in Glasgefäße bringt, aus denen alle Luft sorgfältig ausgepumpt ist. Eine möglichst vollkommene Evakuation der Luft aus Glasgefäßen ist aber nur dann zu erreichen, wenn das Glasgefäß ganz ohne Kitt verschlossen ist, wenn also der Verschluß nur durch Zuschmelzen des Glases hergestellt ist. Es muß also die Kohle auf irgend eine Weise durch Einschmelzen in dem Glasgefäß befestigt sein. Das läßt sich nun zum Glück leicht machen, wenn man die Enden des Kohlendrahtes an Platindrähten befestigt. Platin läßt sich nämlich leicht und dauerhaft in Glas einschmelzen, weil beide denselben Ausdehnungskoeffizienten haben. Bei der Vorzüglichkeit der neuen Quecksilberluftpumpen ist es dann nicht schwer, Glasgefäße fast vollkommen luftleer zu machen. Übrigens werden die Glasgefäße der Glühlampen jetzt zum Teil nicht mehr durch Quecksilberluftpumpen, sondern durch gewöhnliche Ventilluftpumpen mit Maschinenbetrieb evakuiert.

Die Anwendung der Kohle zur Erzeugung von Glühlicht empfahl sich zwar von vornherein durch die erwähnten Vorteile. Aber es war sehr schwer, Kohle in so dünne Streifchen zu bringen, wie sie für das Glühen nötig sind, ohne dabei ihre Haltbarkeit zu beeinträchtigen. Auch dieses ist ein Verdienst von Edison, zum erstenmal außerordentlich dünne Kohlenfäden von großer Haltbarkeit hergestellt zu haben. Edison verfertigte anfangs die Kohlenstreifchen dadurch, daß er sehr dünne Fasern von Bambusrohr verkohlte. Eine solche Faser brachte er dann in die Form eines länglichen Hufeisens und setzte sie in das Glasgefäß ein. Die Enden des Kohlenstreifchens wurden etwas verdickt und durch einen galvanoplastischen Kupferniederschlag mit den ebenfalls etwas verdickten Enden von dünnen Platindrähten verbunden, welche eingeschmolzen durch den Glaskörper hindurchgingen und die Zuleitung des Stromes in die Kohle vermittelten.

Die Herstellung der Kohlenfäden ist aber seit der Einführung des elektrischen Glühlichts immer mehr vervollkommnet worden. Man hat sich bemüht, eine möglichst amorphe, strukturlose Kohle aus Pflanzenstoffen zu gewinnen. Dies geschieht jetzt allgemein in der Weise, daß man reine, künstlich hergestellte Zellulose benutzt. Diese ist vollständig strukturlos. Die Zellulose wird durch eine Düse hindurchgepreßt und liefert dadurch einen endlosen, dünnen Faden, der in kleine Fäden zerschnitten und in die Form von Hufeisen oder Schleifen gebracht wird.

Diese Fäden werden darauf „karbonisiert", verkohlt, indem man sie in einen passend eingerichteten Ofen bringt. Diese Herstellungsweise von Kohlenfäden aus Zellulose liefert ein sehr festes und doch dehnbares Material. Außerdem werden die so hergestellten Kohlenfäden gewöhnlich noch präpariert. Man umgibt nämlich einen solchen Kohlenfaden noch mit einer Schicht von strukturloser Kohle. Dieses letztere erreicht man dadurch, daß man den dünnen Kohlenfaden, die Seele, in Leuchtgas oder einen anderen Kohlenwasserstoff bringt und durch einen elektrischen Strom glühend macht. Dann scheidet sich aus dem Leuchtgas die Kohle in sehr dichtem Zustand auf der Seele ab und der Kohlenfaden erhält überall gleichmäßige Stärke. Man kann nun den Kohlenniederschlag so regulieren, daß der Faden einen gewünschten Widerstand bekommt, und dadurch eine beliebige Menge von Lampen mit gleichem Widerstand herstellen. Die Kohlenfäden werden bei den Lampen entweder einfach hufeisenförmig gebogen, oder sie enthalten mehrfache Windungen oder Schlingen.

Die Enden des Kohlenfadens werden, wie gesagt, an Platindrähten befestigt, welche in Glas eingeschmolzen sind und aus dem evakuierten luftleeren Gefäß herausführen. Diese Verbindung der Kohle mit dem Platin wird gewöhnlich durch Verkupferung oder auch durch einen Kohlenniederschlag bewirkt. Die Platindrähte führen dann zu zwei voneinander isolierten Metallstücken außen am Lampenkörper, die man speziell K o n t a k t e nennt. Jede Lampe wird nun beim Gebrauch in eine F a s s u n g eingesetzt, die an Wandarmen, Kronleuchtern, Lampenständern u. dgl. befestigt ist und zu welcher die beiden Leitungsdrähte, die den Strom in die Lampe schicken sollen, hingeführt sind. Die Fassung enthält also ebenfalls zwei isolierte metallische Teile, mit welchen die äußeren Leitungsdrähte verbunden sind. Sobald die Lampe in ihre Fassung fest eingesetzt ist, geht der Strom durch den Kohlenfaden. In Bezug auf die Fassung der Lampen und die Kontakte des Lampenkörpers bestehen verschiedene Einrichtungen. Bei allen kommt es darauf an, daß der Kontakt ein durchaus sicherer sei. Selbstverständlich muß die Fassung immer zu den Kontakten passen. Die jetzt gebräuchlichsten Fassungen sind die folgenden zwei. Bei der S w a n f a s s u n g (Fig. 430) werden die Enden der Platindrähte des Kohlenfadens in zwei am Boden der Lampe befindliche, voneinander isolierte Messingplatten geführt und die ganze Lampe in die Fassung eingesetzt, so daß durch sogenannten Bajonettverschluß Kontakt hervorgebracht ist. Bei der E d i s o n f a s s u n g (Fig. 431) ist an den Lampenkörper unten ein metallisches Schraubengewinde (das E d i s o n g e w i n d e) angekittet, mit welchem der eine Platindraht verbunden ist. Der andere geht an ein isoliertes Metallstück am Boden. Die Lampe wird in ihre Fassung eingeschraubt. Die Fassung enthält nämlich die zugehörige Schraubenmutter, und in diese führt der eine Draht der Zuleitung. Am Boden der Fassung befindet sich isoliert eine Metallfeder, mit welcher der zweite Zuleitungsdraht verbunden ist. Beim Einschrauben der Lampe in den Träger drückt sich ihr Metallplättchen am Boden auf die Feder auf und bewirkt so einen vorzüglichen Kontakt, so daß der Strom sicher hindurchgehen kann. Bei den Fassungen kann man durch einen Griff (Hahn) die Lampe nach Belieben anzünden oder auslöschen.

Der Hahn dreht nämlich ein Porzellanrädchen, welches leitende und isolierende Sektoren besitzt und dadurch die Leitungsverbindung herstellt oder unterbricht. In Fig. 430 ist ein solcher Hahn dargestellt.

Die Leuchtkraft der Glühlampen hängt außer von der Stärke des Stromes allein ab von der Größe des Widerstandes des Kohlenfadens. Übrigens nimmt der Widerstand der Kohlen bei der Erwärmung, wie wir wissen (S. 83), ab und zwar sehr erheblich, so daß der Widerstand einer Lampe, wenn sie in Weißglut ist, nur etwa halb so groß ist, wie im kalten Zustande.

Man kann jede Lampe natürlich beliebig stark leuchten lassen, wenn man Ströme von verschiedener Stärke durch sie hindurchsendet. Aber der elektrische Strom übt eine zerstörende Wirkung auf die Kohlenfäden

Fig. 430.

Fig. 431.

aus, indem er sie nämlich allmählich zerstäubt, wenn er durch sie hindurchfließt. Je stärker der Strom ist, um so stärker ist diese Zerstäubung und um so leichter wird die Lampe ruiniert, indem schließlich an einer Stelle, an welcher der Kohlenfaden am dünnsten geworden ist, ein Bruch stattfindet. Daher schadet ein zu starker Strom jeder Lampe, und es gibt für jede Lampe eine bestimmte Stromstärke, bei welcher sie einerseits nicht zu sehr in Anspruch genommen wird, andererseits eine passende Helligkeit hat. Man gibt aber gewöhnlich nicht an, mit welcher Stromstärke eine Lampe normal brennt, sondern man gibt an, wie groß die Spannungsdifferenz an ihren Enden sein soll, damit sie normal brenne. Da nämlich der Widerstand der Lampe durch ihre Verfertigung gegeben und bekannt ist, so folgt aus dieser normalen Spannung ohne weiteres auch die normale Stromstärke.

So hat z. B. eine bestimmte Lampe einen Widerstand von 220 Ohm, wenn sie heiß ist. Falls durch diese Lampe ein Strom von 0,5 Ampere hindurchgeht, so brennt sie gerade normal und hat dann eine Leuchtkraft von 16 Kerzen Stärke. Die Stromstärke in einem Leiter ist nun, wie wir wissen, stets gleich der Spannungsdifferenz an seinen Enden, divi-

diert durch seinen Widerstand. Daher kann man leicht ausrechnen, daß an den Enden dieser Lampe eine Spannung von $220 \times 0{,}5 = 110$ Volt herrschen muß. Man sagt daher, daß die betreffende Lampe eine 16 Kerzenlampe für 110 Volt sei, d. h. daß sie bei dieser Spannung einerseits gerade normal mit 16 Kerzen Lichtstärke brennt, andererseits auch genügend lange Zeit aushält. Bringt man diese Lampe zwischen zwei Leitungen von kleinerer Spannungsdifferenz, so ist auch der durchfließende Strom schwächer und die Lampe brennt mit zu geringer Helligkeit. Bringt man sie in eine Leitung von größerer Spannung, so wird der Strom stärker, der durch sie hindurchfließt, dadurch wird auch die Helligkeit größer, aber nur auf Kosten der Lebensdauer der Lampe. Im Durchschnitt brennt jede Glühlampe, wenn sie nie einen stärkeren Strom als den für sie normalen bekommt, 600—800 Stunden. So hat es sich eingebürgert, die Glühlampen einfach nach der Zahl der Volt zu charakterisieren, die sie zum normalen Brennen brauchen. Man spricht von einer Lampe für 4 Volt, 10, 25, 100 etc. Volt. Eine jede solche Lampe hat nun eine bestimmte normale Helligkeit, und zwar gibt es Glühlampen in allen Größen, deren Lichtstärke von einer einzigen Normalkerze bis zu mehreren Hunderten variiert. Für die Beleuchtung in Zimmern ist die passendste Helligkeit die von etwa 16 Normalkerzen und daher haben auch die am meisten gebrauchten Glühlampen diese Lichtstärke. Für bessere Beleuchtung nimmt man Lampen von 25, 32 oder auch 50 Kerzen. Lampen von geringerer Helligkeit, bis zu einer Normalkerze, werden nur für spezielle Zwecke, etwa als Nachtlampen, für Dekorationszwecke oder dergleichen benutzt, während Lampen von größerer Helligkeit, bis zu 100 oder 200 Normalkerzen hauptsächlich zur Beleuchtung in Straßenlaternen dienen.

Da an den Enden einer jeden Lampe eine bestimmte Spannung in Volt herrscht und da die Lampe von einem Strom mit einer bestimmten Zahl Ampere durchflossen wird, so enthält jede brennende Lampe einen gewissen Effekt, d. h. es wird in jeder Sekunde eine gewisse Arbeitsmenge verbraucht, um eben die Lampe zum Leuchten zu bringen. Der Effekt in der Lampe (in Watt ausgedrückt) ist gleich dem Produkt der Volt und der Ampere (s. S. 114). Also z. B. unsere eben erwähnte Lampe, die bei 110 Volt Spannung 0,5 Ampere Stromstärke braucht, um normal zu brennen, hat dabei einen Effekt von 55 Watt. Da nun 736 Watt = 1 Pferdekraft sind, so verbraucht die Lampe beim normalen Brennen $\frac{55}{736}$ = etwa $\frac{1}{13}$ PS. Es können also durch eine Pferdekraft etwa 13 solcher Lampen betrieben werden. Da die Lampe bei 55 Watt Verbrauch eine Lichtstärke von 16 Normalkerzen gibt, so kommt auf jede Kerze ein Verbrauch von $\frac{55}{16} = 3{,}4$ Watt. Im allgemeinen brauchen alle Glühlampen stets etwa 2,5 bis 3,5 Watt für eine Normalkerze Helligkeit. Dieser geringe Verbrauch an Arbeit ist die Folge der rationellen Herstellungsweise der Kohlenfäden. In den ersten Zeiten des Glühlichts war der Verbrauch der Arbeit ein weit höherer. Eine Lampe von 16 Kerzen verbrauchte nicht 55 Watt, wie jetzt, sondern 80 und mehr Watt.

Solche Glühlampen werden von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin (sogenannte A.E.G.-Glüh-

lampen), von Siemens & Halske und von anderen im großen fabriziert und zwar für Lichtstärken von $^1/_4$ Normalkerze bis zu 400 und für alle gebräuchlichen Spannungen. Die gebräuchlichsten Lampen sind diejenigen für 100 oder 110 Volt Spannung und für 16 oder 25 Kerzen Stärke. Diese Lichtstärken sind für normale und für besonders gute Zimmerbeleuchtung gerade die richtigen und die angegebene Spannung kommt bei der Stromlieferung durch Zentralstationen am meisten vor.

Die großen Lichtstärken von 200 bis 400 Kerzen sind nur in wenigen

Fig. 432.

Fällen vorteilhaft anwendbar. Bei Helligkeiten von 200 Kerzen an wird man im allgemeinen besser eine Bogenlampe, besonders eine Liliputlampe, anwenden.

Die Form der Kohlenfäden ist beliebig. Sie bilden bald ein einfaches Hufeisen, bald bilden sie eine oder mehrere Schleifen.

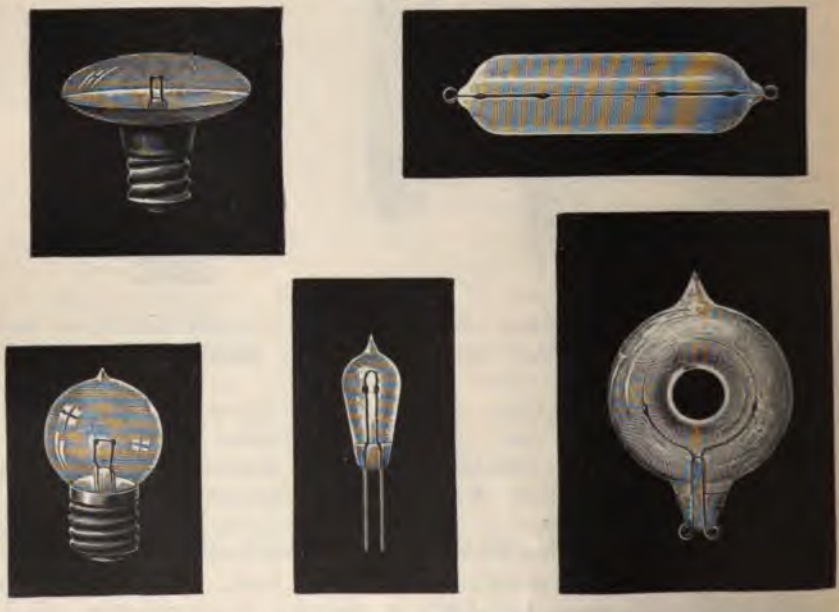
Die Glasgefäße der Glühlampen werden durchsichtig oder matt, farblos oder farbig hergestellt. Fig. 432 stellt einige gebräuchliche Formen von Glühlampen zu gewöhnlichen und zu dekorativen Zwecken dar. Die Kontakte derselben bestehen zum Teil aus den beschriebenen Platten oder Gewinden, zum Teil aber auch aus Stäben oder Ösen. Manchmal werden die Glasgefäße mit einem metallisch spiegelnden Belag versehen, wie in Fig. 433, wodurch sie als Reflektorlampen dienen. Für spezielle Zwecke werden auch kleine Glühlampen verfertigt, die für geringe Spannungen (von 2 bis 30 Volt) berechnet sind, also durch einzelne Akkumulatoren oder Trockenelemente schon betrieben werden können. Sie haben natürlich auch nur geringe Lichtstärken, von $^1/_{10}$ Kerze an.

Benutzt werden sie vielfach für ärztliche Zwecke, für Taschenlaternen, zum Ausleuchten von Gefäßen u. s. w. Fig. 434 stellt einige solche Lampen dar. Die ringförmige Lampe dient für Augenärzte zur Beleuchtung der Netzhaut.

Fig. 433.

Gewöhnlich werden die Lampen in Glocken eingesetzt, welchen irgend eine passende Form, z. B. die eines Kelches, gegeben wird, so daß die Glühlichtbeleuchtung auch vorteilhaft für Dekoration von Räumen verwendet wird. Darin ist sie sogar der Gasbeleuchtung überlegen, da man Glühlampen, wegen ihrer Ungefährlichkeit, auch nahe an Wänden oder Täfelungen, in Nischen, in Blumenbouquets u. s. w. leicht anbringen kann. Im übrigen werden die Glühlampen in allen möglichen Anordnungen verwendet, entweder als Einzellampen oder in Lüstern von einigen oder vielen Lampen, so daß sich die Glühlichtbeleuchtung in nichts von der Gasbeleuchtung unterscheidet. Tragbare oder verstellbare Lampen müssen durch Leitungsschnüre mit derjenigen Leitung verbunden sein, von der der Strom entnommen wird. Zu dem Zweck erhalten sie

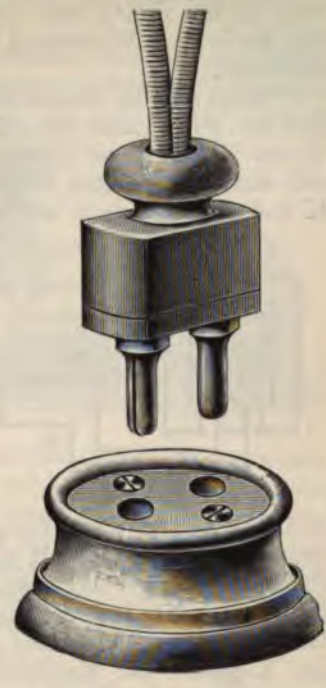
Fig. 434.



Steckkontakte, welche in Anschlußdosen eingesteckt werden. Eine solche Einrichtung zeigt Fig. 435. Eine Dose aus Ebonit oder Porzellan wird an der Wand befestigt und die Leitung wird zu ihr so geführt, daß in jedem der beiden Löcher je einer von den Leitungsdrähten endet und zwar in einer metallischen Auskleidung der Löcher. In die Dose kann

nun der darüber gezeichnete Stöpsel (Steckkontakt) eingesetzt werden, so daß dessen federnde Füße in die Löcher gesteckt werden. Der Stöpsel selbst wird z. B. an der tragbaren Lampe, Fig. 436, vermittels der Leitungsschnur so befestigt, daß die Enden dieser Schnur einerseits mit den Kontakten der Fassung, andererseits mit den beiden Füßen des Stöpsels verbunden sind.

Fig. 435.



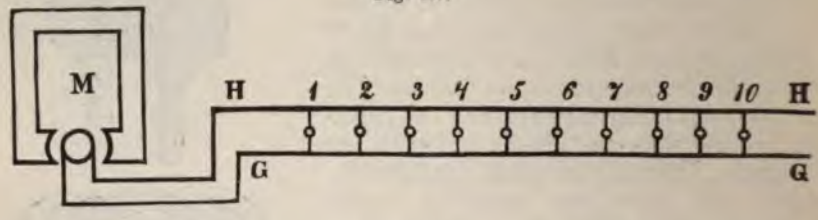
Die Glühlampen besitzen im allgemeinen einen sehr hohen Widerstand, der über 100 Ohm geht, und brauchen daher auch eine große Spannung an ihren Enden, aber sie brauchen nur verhältnismäßig schwache Ströme. Für eine 16kerzige Glühlampe von 100 Volt Spannung braucht man einen Strom von etwa nur $^1/_2$ Ampere. Um nun eine ganze Anzahl Glühlampen von einer und derselben Quelle (Dynamomaschine oder Akkumulatoren) betreiben zu lassen, so daß sie unabhängig voneinander sind, hat Edison zuerst die einfachste Schaltung angegeben. Er schaltete nämlich nicht etwa die Lampen alle hintereinander in denselben Stromkreis, sondern er brachte die Glühlampen in sogenannte Parallelschaltung. Dadurch machte er das Glühlicht für alle Zwecke der praktischen Anwendung geeignet und zur Beleuchtung von Stadtteilen im großen brauchbar, und diese Anordnung hat sich außerordentlich bewährt. Sie ist jetzt ganz allgemein als die zweckmäßigste Art der Schaltung von elektrischen Apparaten anerkannt und benutzt. Edison schaltete also die Lampen alle nebeneinander, d. h. so, wie es in Fig. 437 gezeichnet ist, in welcher M die Stromquelle (Maschine) und 1, 2, 3 bis 10 die Lampen sind. Es gehen also von der Stromquelle dabei zwei Leitungen H H und G G aus und zwischen diese werden die einzelnen Lampen geschaltet. Durch die Nebeneinanderschaltung der Lampen wird der gesamte Widerstand des äußeren Stromkreises kleiner als der jeder einzelnen Lampe. Haben die Verbindungsdrähte (welche man ja beliebig stark nehmen kann) einen sehr kleinen Widerstand, so ist der äußere Widerstand z. B. bei 10 Lampen, von denen jede 200 Ohm Widerstand hat, bloß $\frac{200}{10} = 20$ Ohm, bei 40 Lampen bloß $\frac{200}{40} = 5$ Ohm, bei 1000 Lampen bloß $\frac{200}{1000} = 0{,}2$ Ohm. Durch jede von den Lampen fließt aber bloß ein Zweigstrom, und zwar muß dieser Zweigstrom so groß sein, daß er die

Fig. 436.

Lampe zur normalen Lichtstärke bringt, oder mit anderen Worten, es muß an den Enden einer jeden Lampe eine solche Spannung herrschen, daß sie in dem Widerstand der Lampe gerade den normalen Strom hervorbringt.

Wenn nun die Hauptleitungen H H und G G so dick gemacht werden, daß ihr Widerstand vernachlässigt werden kann, dann herrscht an den Enden jeder Lampe dieselbe Spannung. Denn man kann das Schema sich einfach so denken, wie es in Fig. 438 gezeichnet ist. Von den Enden H und G gehen dann alle Lampen (in der Figur sind 5 gezeichnet) aus

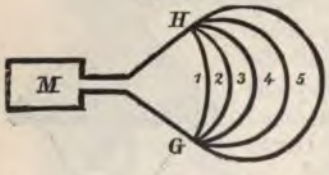
Fig. 437.



und jede hat an ihren Enden dieselbe Spannung, nämlich die Spannung zwischen den Punkten H und G. Damit nun alle Lampen immer mit gleicher Helligkeit brennen, ist nur nötig, daß die Spannung zwischen H und G immer konstant gehalten wird, daß diese immer dieselbe bleibt. Wenn also der Widerstand der Leitungen H und G (Fig. 437), die von den Klemmen der Maschine ausgehen und zwischen denen die Lampen parallel geschaltet sind, sehr klein ist (und in der Praxis wird er auch immer sehr klein gemacht), so ist zum normalen Brennen nur nötig, daß die Spannung an den Klemmen der Maschine (die Klemmenspannung) immer denselben Wert hat.

Um daher eine Glühlichtbeleuchtung brauchbar herzustellen, kann man alle diejenigen Stromerzeuger benutzen, welche entweder von selbst konstante Klemmenspannung besitzen, oder bei denen sie sich leicht herstellen läßt. Die vorteilhaftesten Stromerzeuger sind daher die Akkumulatoren. Denn diese liefern immer konstante Spannung, welche nur ganz allmählich abnimmt und durch Zellenschalter noch reguliert werden kann. Sie sind namentlich für Privathäuser am meisten angebracht, in denen eine fachmännische Bedienung für die Anlage gewöhnlich fehlt.

Fig. 438.



Für große ausgedehnte Zentralstationen aber werden zur Erzielung konstanter Spannung immer Nebenschlußdynamos benutzt.

Bei diesen kann man ja, wie wir S. 381 gesehen haben, durch Regulierung des Nebenschlusses die Klemmenspannung absolut konstant erhalten. Es ist dazu notwendig, daß eine Person ein Voltmeter dauernd beobachtet und die Widerstände passend ein- oder ausschaltet. Man hat zwar mehrfache Mittel, um diese Regulierung auf konstante Spannung selbsttätig, automatisch, durch den Strom selbst zu machen. Doch wird

bei großen Anlagen die Regulierung fast durchweg von dem Maschinisten vorgenommen.

Wenn also in solcher Weise von der Maschine oder von den Akkumulatoren aus für stets gleichbleibende Spannung gesorgt wird, so kann man eine jede Lampe oder ganze Lampengruppen beliebig auslöschen oder anzünden, ohne die anderen zu stören.

Fig. 439.

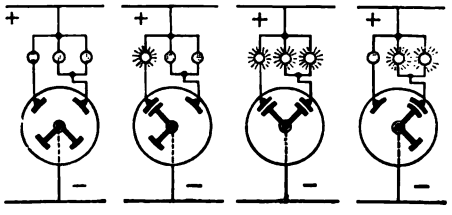
Lampen, die zugänglich sind, und einzeln entzündet oder ausgelöscht werden sollen, werden in ihren Fassungen mit einem Hahn versehen, der beim Drehen einen Kontakt hervorbringt oder schließt. Man kann jedoch einzelne Lampen oder viele zusammen auch bequem von der Ferne entzünden oder auslöschen, indem man nur in die Leitung zu den Lampen einen Ausschalter irgendwo anbringt. Diese Ausschalter, von denen Fig. 439 eine vielbenutzte Form von Voigt & Häffner in Frankfurt a. M. geöffnet zeigt, bestehen aus einem an dem Griff befestigten ebenen Metallstück S, das beim Drehen des Griffes entweder auf den beiden federnden Metallstreifen F aufliegt, oder frei in der Luft sich befindet. Die Federn sind mit der Leitung verbunden. Durch Drehen des Griffes bewirkt man also abwechselnd Kontakt und Unterbrechung. Die ganze Kontaktvorrichtung befindet sich in einer Hülle von Holz, Porzellan oder Metall. Die Hülle kann natürlich auch sehr geschmackvoll mit Verzierungen ausgestattet werden.

Fig. 440.

Es wird also z. B. die Leitung, welche in ein Zimmer führt und zwischen deren beide Drähte alle Lampen dieses Zimmers eingeschaltet sind, zuerst an diesen Ausschalter geführt, so daß der eine Leitungsdraht unterbrochen ist und die beiden Enden mit den federnden Metallstücken verbunden sind. Durch eine bloße Drehung des Griffes kann man dadurch sofort das ganze Zimmer erleuchten oder verdunkeln. Auch kann man die Ausschalter an einer Leitungsschnur von der Decke herabhängen lassen, wie Fig. 440 zeigt. Ein Druck auf den Kopf der Birne dreht die Kontaktstücke und bringt dadurch Kontakt hervor, ein folgender Druck dreht sie weiter und hebt den Kontakt wieder auf u. s. f. Gerade diese Leichtigkeit des Anzündens und Auslöschens von der Ferne macht das Glühlicht äußerst bequem und gibt ihm manche Vorzüge vor dem Gaslicht. Man kann auch den Ausschalter so einrichten, daß er mehrere Kontakte besitzt, so daß man z. B. je nach seiner Stellung von einem Lüster ein Viertel der Lampen, oder drei Viertel, oder alle Lampen brennen lassen kann. Solche Schalter nennt man Serienschalter. Das

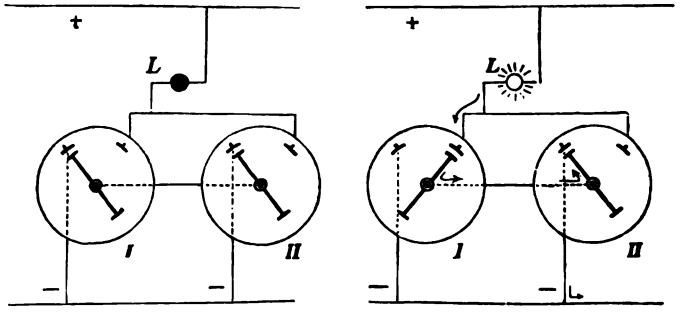
Schema einer solchen Einrichtung ist in Fig. 441 gezeichnet. Zwischen die beiden horizontal gezeichneten Hauptleitungen sind zwei parallel geschaltete Leitungen gelegt, von denen die erste eine Lampe, die zweite zwei enthält. Der Serienschalter, der durch einen Kreis mit Kontakten und dem doppelarmigen Griff dargestellt ist, gestattet nun, wenn man den Griff in der Richtung des Uhrzeigers dreht, folgende Verbindungen zu machen. In der ersten Stellung ist alles ausgeschaltet, in der zweiten brennt die Einzellampe, in der dritten brennen alle drei Lampen, in der vierten bloß die beiden zusammengeschalteten. Solche Schaltungen kann man natürlich in beliebiger Komplikation ausführen.

Fig. 441.



Häufig will man eine Glühlampe oder einen Lüster nicht bloß von einer Stelle aus anzünden und auslöschen können, sondern von zwei oder mehr Stellen aus. Bei der Treppenbeleuchtung z. B. will man beim Eintreten in die Haustüre die Treppenlampen anzünden und an der Wohnungstüre sie auslöschen können oder umgekehrt. Die zu diesem Zweck dienenden Ausschalter bezeichnet man als Korrespondenzschalter. In Fig. 442 sieht man die beiden Schalter I und II, deren Drehpunkte durch eine Leitung verbunden sind. Von jedem Schalter ist der eine Kontakt mit der einen Leitung (—), die anderen Kontakte beider Schalter

Fig. 442.



sind miteinander verbunden und von dieser Verbindung geht eine Leitung zu der Lampe L und durch diese zu dem +Pol. Man sieht in der ersten Figur die Kontaktstücke parallel stehen, wodurch die Stromzufuhr zur Lampe unterbrochen ist und daher die Lampe nicht brennt, in der zweiten Figur stehen die Kontaktstücke gekreuzt und die Lampe erhält dadurch Strom und brennt. Durch Weiterdrehen eines der beiden Kontakte kann man daher, wie auch der andere gerade steht, abwechselnd die Lampe anzünden oder auslöschen.

Eine Gefahr bietet bei allen elektrischen Anlagen der sogenannte Kurzschluß. Da nämlich in jedem Haus, in welchem elektrische Einrichtung besteht, die beiden voneinander isolierten Leitungen, welche

110 oder 220 Volt Spannung besitzen, durch alle Stockwerke und alle Zimmer laufen, so ist mit größter Sorgfalt darauf zu achten, daß diese Leitungen nie in eine unbeabsichtigte leitende Verbindung kommen. Alle Lampen, alle Heizapparate, alle Motoren sind zwar zwischen diese Leitungen geschaltet, aber die Widerstände dieser Apparate und der Querschnitt der in ihnen vorhandenen Drähte ist so abgemessen, daß sie nur die von vornherein normierte Stromstärke höchstens erhalten können. Wenn aber an irgend einer Stelle die beiden Hauptleitungen in unbeabsichtigten Kontakt kommen, also kurz geschlossen werden, so kann die Stromstärke in der ganzen Leitung außerordentlich groß werden, wodurch dann auch starke Joulesche Wärme, also Erhitzung der Drähte eintritt, und damit Verbrennung ihrer Umspinnung und benachbarter Holz- oder Stoffteile, kurz rapide Feuergefährlichkeit. Sind z. B. die beiden Drähte so ungenügend an der Wand befestigt, daß der eine auf den andern fallen kann und ist ihre Umspinnung etwa durch einen Zufall beschädigt, so können momentan Stromstärken von 100 und mehr Ampere in den Leitungen auftreten. Um diese Gefahr zu vermeiden, müssen erstens die Leitungen mit der größten Sorgfalt gelegt und isoliert werden. Ferner

Fig. 443.

Fig. 444.

Fig. 445.

aber muß dafür gesorgt werden, daß alle Apparate, also in unserem Falle die Glühlampen, gegen etwaige Zufälle, die durch zu starke Ströme entstehen, geschützt werden. Dieser Schutz ist zuerst von Edison angegeben worden.

Er besteht darin, daß an allen passenden Stellen, an allen Verzweigungspunkten der Leitungen dünne Streifen aus Blei oder Silber in die Leitung eingeschaltet werden, sogenannte Sicherungen, welche so abgemessen werden, daß sie rasch schmelzen, wenn ein stärkerer Strom durch sie hindurchfließt als derjenige, den sie noch gerade aushalten sollen. Sowie der Strom momentan eine zu große Stärke bekommt, welche für die Lampen gefährlich sein könnte, schmilzt die Sicherung weg und unterbricht dadurch den Strom. Es erlöschen dann zwar alle Lampen, die hinter dieser Sicherung eingeschaltet sind, aber sie bleiben intakt und es läßt sich der Draht mit Leichtigkeit ersetzen.

Solche Sicherungen, die zum Teil aus Bleistreifen, zum Teil aus Silberstreifen hergestellt werden, werden in die Hauptleitungen, ferner in die Zweigleitungen und endlich an jeder Abzweigung für eine Lampengruppe, also z. B. vor jedem Zimmer, eingeschaltet. Eine zweckmäßige Form der Sicherung besteht darin, daß man in einen Stöpsel aus Gips (Fig. 443), der am Boden eine Metallplatte und an der Seite eine metallische Schraube trägt, den Bleistreifen zwischen Grundplatte und Schraube befestigt. Die Stöpsel werden in einen Sicherheitsschalter (Fig. 444)

eingeschraubt, zu dem die Leitungen von der Maschine geführt werden. Man verfertigt die Stöpsel für die Stromstärken 3, 5, 10, 24 u. s. w. Ampere. Für Schaltbretter werden die Sicherungen, die dort viel stärkere Ströme auszuhalten haben, in der Form der Fig. 445 hergestellt, ein Bleistreifen, der an beiden Seiten durch eine Klemme festgeschraubt werden kann. Bei hochgespannten Strömen von mehr als 500 Volt müssen die Bleisicherungen anders konstruiert werden, worauf aber hier nicht eingegangen werden kann.

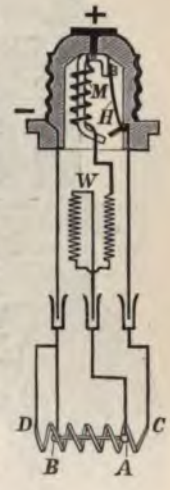
Für kleine Einrichtungen, für einzelne Privathäuser z. B. mit 50, 60 Lampen, für die man eine besondere Maschine aufstellen muß, ist die elektrische Beleuchtung etwas kostspielig. Sie stellt sich dann nicht nur teurer als die Beleuchtung durch Gas, sondern sie ist auch umständlicher, insofern man eine besondere Bedienung für die Maschine braucht. Sie ist daher nur für solche Privathäuser anwendbar, in denen die Kosten gegenüber der Bequemlichkeit und Schönheit des Glühlichts keine Rolle spielen. Wohl aber ist die eigene Glühlichtbeleuchtung für große Hotels, Fabriken Vergnügungslokalitäten auch in Bezug auf den Kostenpunkt der Gasbeleuchtung meistens nicht unterlegen, namentlich wenn die bald zu erwähnenden Lampen mit geringem Effektbedarf genommen werden. In diesen Fällen ist es aber gewöhnlich vorteilhaft, die Beleuchtung nicht direkt von der Maschine besorgen zu lassen, sondern indirekt, indem man durch die Maschine zunächst eine Akkumulatorenbatterie laden läßt und von dieser die Ströme für die Beleuchtung entnimmt. Der Vorteil besteht darin, daß erstens die Spannung der Akkumulatoren sehr konstant bleibt, zweitens aber, daß man von ihnen zu jeder Zeit Strom erhalten kann, wenn sie einmal geladen sind, also auch in der Nacht, so daß man nicht nötig hat, die Dynamomaschine Tag und Nacht laufen zu lassen.

Für die Beleuchtung von Privathäusern ist es natürlich am bequemsten und vorteilhaftesten, wenn die elektrischen Ströme in großen Zentralen erzeugt und von diesen aus in die einzelnen Häuser ganzer Stadtteile oder Städte gesendet werden, ganz wie bei der Gasbeleuchtung von den großen Gasometern aus das Gas geliefert wird. Solche Zentralen sind allmählich in vielen großen, mittleren und kleinen Städten ausgeführt worden. Insbesondere sind die Elektrizitätswerke in Berlin eine großartige Anlage, welche einen sehr großen Teil von Berlin mit Elektrizität versorgt. Die Einrichtungen solcher Zentralstationen, sowie überhaupt die ganze Frage nach der Verteilung der Elektrizität von einer Stelle aus auf einen weiten Bezirk sind in Kap. 9 dieses Abschnittes behandelt.

Dem elektrischen Glühlicht ist durch die Erfindung des Auerschen Gaslichtes ein starker Abbruch geschehen. Das Auerlicht ist nicht nur bedeutend heller, sondern auch bedeutend billiger als das Glühlicht, und viele Anlagen, die bereits mit elektrischem Glühlicht beleuchtet waren, gingen trotz der größeren Unbequemlichkeit des Gaslichtes wieder zu diesem zurück, da die Einrichtung desselben mit Auerschen Strümpfen ökonomisch von erheblichem Vorteil ist. Es wurde daher lange Zeit in der Elektrotechnik die Frage ventiliert, ob man nicht auch das elektrische Glühlicht so verbessern könne, wie Auer das Gaslicht verbessert hatte, indem man statt der glühenden Kohle, die ja sowohl beim elektrischen wie bei dem gewöhnlichen Gaslicht das Leuchtende ist, die weißglühenden

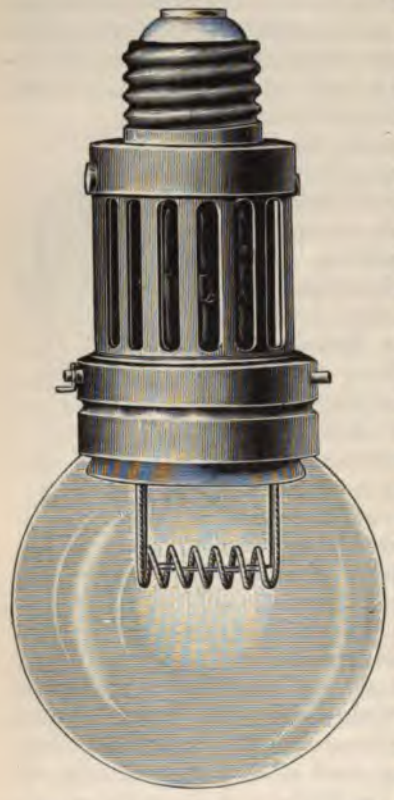
Erden, mit denen die Glühstrümpfe imprägniert sind, auch bei der Elektrizität als Leuchtkörper benutzt. Diese Stoffe sind feuerbeständig und können eine viel höhere Temperatur als die Kohle annehmen und dadurch ein intensives und ökonomisches Licht ausstrahlen. Aber zum Unglück sind diese Substanzen, wie z. B. Magnesiumoxyd, in kaltem Zustand elektrische Nichtleiter. Erst bei sehr hohen Temperaturen, bei Rotglut, werden sie gute Leiter der Elektrizität und zwar namentlich dann, wenn man nicht eine einzige reine Substanz, sondern ein Gemisch mehrerer derartiger Substanzen anwendet. Aber gerade die hohe Temperatur, bei der sie erst leitend werden, macht ihre direkte Anwendung zu Beleuchtungszwecken schwierig, da ein Stäbchen aus solcher Substanz nicht von selbst durch den Strom glühend wird, weil es eben zunächst keinen Strom durchläßt, sondern erst vorher erwärmt werden muß, um überhaupt zu leiten. Wenn aber diese Schwierigkeit überwunden werden kann, so eignen sich diese Körper deswegen mehr für Beleuchtungszwecke, als die Kohle, weil sie höhere Temperaturen annehmen können als diese und dabei verhältnismäßig mehr Licht als Wärme ausstrahlen. Die erwähnten und andere technische Schwierigkeiten so zu überwinden, daß eine brauchbare und bequeme Glühlampe mit derartigen Körpern hergestellt werden konnte, war keine leichte Aufgabe und erforderte jahrelange Arbeit seitens des Erfinders dieser Lampen, Professor Nernst in Verbindung mit der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Jetzt aber sind diese Nernstlampen im Handel und erfreuen sich wachsender Beliebtheit. Die Lampe enthält ein Stäbchen aus Magnesia mit Beimengungen anderer Erden. Wenn man ein solches erst vorerwärmt hat, auf Rotglut, d. h. bis auf 600 bis 800° C., und dann den elektrischen Strom hindurchsendet, so leuchtet es hell weiß und verbraucht für gleiche Lichtstärke nur etwa die Hälfte der Watt, wie eine gewöhnliche Glühlampe. Die Vorwärmung geschieht automatisch durch eine um das Stäbchen gewundene Heizspirale. Außer dem Magnesiastäbchen, dem eigentlichen Brenner, und der Heizspirale besitzt die Lampe noch einen Vorschaltwiderstand und einen kleinen Elektromagneten, welch letzterer dazu dient, den Strom zuerst durch die Heizspirale und dann bloß durch den Brenner zu senden. Die Einrichtung einer solchen Nernstlampe mit selbsttätiger Entzündung zeigt Fig. 446. Das Stäbchen A B ist der eigentliche Leuchtkörper aus Magnesia. Um diesen ist in einigen Windungen ein auf Asbest aufgewundener Heizdraht C D gelegt, welcher zunächst von dem Strom zum Rotglühen gebracht wird und dadurch das Stäbchen A B erwärmt. Es geht nämlich der Strom beim Einschalten der Lampe von der +Klemme über H nach dem Platindraht C D und dann zur — Klemme. Zugleich könnte der Strom auch von der + Klemme über den kleinen Elektromagneten M und den Vorschaltwiderstand W zu dem Stäbchen A B gehen. Dieses ist aber eben in kaltem Zustand ein Nichtleiter. Die Platindrahtspirale erhitzt nun allmählich in ¼ bis ½ Minute durch Strahlung den Magnesiafaden und dadurch geht nun wirklich der Strom in immer größerer Stärke durch M W A B zur —Klemme und befördert durch seine

Fig. 446.



Joulesche Wärme die Erhitzung desselben und infolgedessen auch seine Leitungsfähigkeit. Sowie dieser Strom eine passende Stärke erreicht hat, wird der Magnet M auch stark genug, seinen Anker H anzuziehen. Dadurch ist aber der Strom in der Platinspirale unterbrochen und der ganze Strom geht nun durch das Stäbchen A B und bringt dieses zum hellen Weißglühen. Der Vorschaltwiderstand besteht aus einem dünnen Eisendraht, der in eine Glasröhre eingeschlossen und in dieser von Wasserstoff umgeben ist. Ohne einen solchen Vorschaltwiderstand würde sich die Temperatur des Heizkörpers und damit die durchgehende Stromstärke so steigern, daß der Brenner durchschmilzt. Der Draht W aber aus Eisen erlangt bei höherer Temperatur von selbst größeren Widerstand, namentlich bei Rotglut, der die Widerstandsabnahme des Brenners so kompensiert, daß die durchgehende Stromstärke nahezu unverändert bleibt, auch wenn die Spannung des Stromes Schwankungen erfährt. Das Licht der Nernstlampe ist sehr glänzend und weiß; es übertrifft an Glanz und Weiße das Auerlicht. Die Lampen (Modell B) sind, wie die Fig. 447 zeigt, mit einer übergeschobenen Kugelglocke versehen und tragen am Fuß das Edisongewinde, mit welchem sie in die gewöhnlichen Glühlampenfassungen eingeschraubt werden. Andere Lampen (Modell A), bei denen Stäbchen und Spirale vertikal stehen, werden für größere Lichtstärken gebraucht und sind zum Aufhängen eingerichtet. Bei beiden Lampen sind die einzelnen Teile, Sockel, Vorschaltwiderstand, Brenner und Glocke, so eingerichtet, daß sie nur einfach ineinander gesteckt zu werden brauchen. Die Lampen können für alle Lichtstärken von 16 bis 250 Hefnerkerzen hergestellt werden. Der Stromverbrauch beträgt bei diesen Lampen nur etwa 1,5 bis 1,7 Watt pro Kerzenstärke, während eine gewöhnliche Glühlampe etwa das Doppelte, nämlich 3,2 bis 3,5 Watt pro Kerze verbraucht. Die Nernstlampen sind nicht so haltbar, wie die gewöhnlichen Glühlampen. Durchschnittlich nach 300 Brennstunden muß der Glühkörper ersetzt werden, auch nehmen die Lampen schon vorher während des Gebrauches an Leuchtkraft erheblich ab. Da aber die Lampen nicht luftleere Gefäße haben, wie die Glühlampen mit Kohlenfäden, so kann man bei ihnen den Brenner leicht ersetzen. Trotzdem muß man bei den Nernstlampen für Ersatzkosten pro Jahr bedeutend mehr als bei den gewöhnlichen Lampen rechnen. Das langsame Anzünden, die kurze Lebensdauer, die

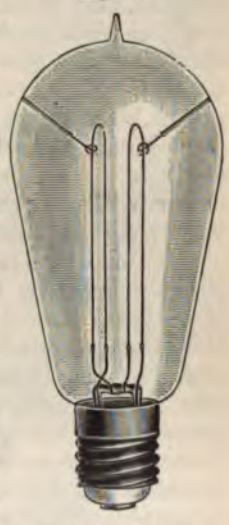
Fig. 447.



Empfindlichkeit gegen Spannungsveränderungen, der hohe Preis sind allerdings schwerwiegende Nachteile dieser Lampe, denen aber als Vorteil die wesentliche Ersparnis an Stromkosten und die Schönheit des Lichtes gegenüberstehen. Um die Unbequemlichkeit des langsamen Angehens der Lampe weniger fühlbar zu machen, werden sogenannte Nernst-Expreßlampen in den Handel gebracht. Dieselben enthalten außer der Nernstlampe noch eine oder mehrere gewöhnliche Glühlampen, welche durch den Heizstrom betrieben werden, also sofort bei der Einschaltung der Lampe leuchten und, sobald der Heizstrom durch das Glühen des Nernstkörpers sich ausschaltet, auch selbsttätig ausgeschaltet werden. Für viele Zwecke, für Straßenbeleuchtung, sowie für die Beleuchtung von Restaurationen, Sälen u. s. w. mag das Nernstlicht sich als nützlich, nicht im Gegensatz, sondern im Verein mit dem gewöhnlichen Glühlicht erweisen.

Auf einem ganz anderen Wege suchte Auer von Welsbach, der berühmte Erfinder des nach ihm benannten Gasglühlichts eine viel ökonomischere Lampe herzustellen, als es die gewöhnlichen Glühlampen sind. Daß diese verhältnismäßig wenig Licht bei gegebener Energiezufuhr liefern, beruht darauf, daß sie nicht zu so hohen Temperaturen gebracht werden können, wie etwa die Kohlen des Bogenlichts. Die dünnen Fäden würden bei diesen hohen Temperaturen zu leicht zerstäuben. Je höher aber die Temperatur eines leuchtenden Körpers ist, um so mehr Licht strahlt er aus, im Verhältnis zur aufgewendeten Energie. Deswegen bestrebte sich Auer, das Glühlichtproblem dadurch zu lösen, daß er statt der Kohle das am allerschwersten schmelzbare Metall, Osmium, für die Glühlampenfäden benutzt. Es war sehr schwer, Methoden zu finden, durch welche man das Osmium in Form von Fäden oder Drähten bringen kann. Das Osmiummetall wird durch Reduktion des Osmiumtetroxyds in sehr fein verteiltem Zustand erhalten, man kann es zwar auch bei den höchsten Temperaturen schmelzen, aber das Metall ist zu spröde, um sich ziehen oder walzen zu lassen. Man mischt deshalb jetzt das fein verteilte Osmium mit organischen Bindemitteln, so daß man eine zähe Paste hat, die sich ebenso wie die Zellulose der gewöhnlichen Glühlampen durch Düsen hindurch pressen und damit in Fadenform bringen läßt. Durch Erhitzen dieses Fadens bis zur Weißglut werden die organischen Substanzen schließlich in Kohlensäure und Kohlenoxyd verwandelt, und es bleibt ein fast kohlenstofffreier Faden aus Osmium übrig, der dann beim Brennen noch mehr zusammensintert, und eine glattere Oberfläche bekommt. Von diesen Osmiumlampen oder, wie sie jetzt offiziell, etwas komisch, genannt werden, Auer-Oslampen, gibt Fig. 448 eine Abbildung. Bei ihnen ist bei gleicher Energiezufuhr die Lichtstärke des Glühkörpers eine viel höhere, als bei den gewöhnlichen Lampen. Sie konsumieren bloß 1,5 Watt pro Kerze an Energie. Infolge der großen Leitfähigkeit des Osmiums haben selbst die dünnsten Fäden, die man herstellen kann, wenn man ihre Länge in mäßigen Grenzen halten will,

Fig. 448.

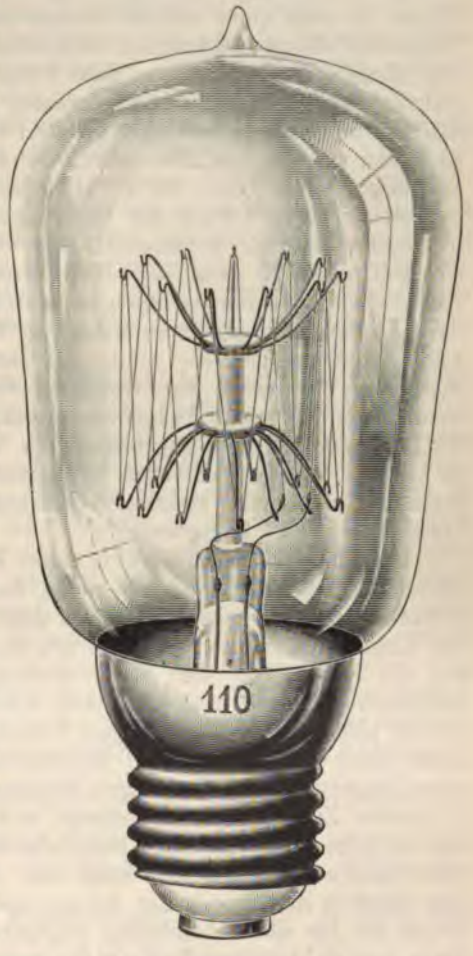


einen verhältnismäßig kleinen Widerstand, und daher werden diese Lampen meistens nur für 16 bis 44 Volt Spannung konstruiert. Da die meisten Zentralen auf 110 Volt Spannung eingerichtet sind, so muß man daher in solchen Fällen immer drei Osmiumlampen hintereinander schalten. Man geht ja im Gegenteil wegen der Billigkeit der Stromfortleitung allmählich zu immer größeren Spannungen in den Zentralen über. Von 100 bis 110 Volt ist man jetzt schon auf 220, ja sogar auf 440 Volt Spannung in den Leitungsnetzen gestiegen, und in diesem Fall müßte man immer 3, 7, 15 solcher Osmiumlampen (von 35 Volt) hintereinander schalten und zusammen brennen lassen. Die Deutsche Gasglühlichtgesellschaft, welche diese Lampe anfertigt, ist aber in der Konstruktion so fortgeschritten, daß sie jetzt auch Lampen für 55 bis 78 Volt herstellt. Letztere brennen zu dritt in einer Leitung von 220 Volt Spannung. Die Osmiumlampen haben eine durchschnittliche Lebensdauer von weit über 1000 Brennstunden. Sie besitzen auch den Vorzug vor den Kohlenglühlampen, daß das Glas nicht merklich durch ihre Zerstäubung beschlagen wird, während die Gläser der gewöhnlichen Glühlampen ziemlich rasch schwarz werden und infolgedessen die Leuchtkraft der Lampe beeinträchtigen. Eine sehr große Anwendung haben die Osmiumlampen hauptsächlich wohl wegen ihres hohen Preises noch nicht erzielt. Ihre Benutzung schreitet aber stetig fort. Für sehr geringe Spannungen, wenn z. B. der Strom nur durch wenige Akkumulatoren geliefert wird, ist die Osmiumlampe von vornherein gut geeignet.

Es bildete eine große Überraschung, als in dem letzten Jahre die Firma Siemens & Halske eine neue Glühlampe einführte, die auch einen Metallfaden statt des Kohlenfadens enthält, aber einen Faden aus einem Metall, das bisher noch nie in größeren Mengen überhaupt bekannt war, dem Tantal. Von dem metallischen Tantal war bekannt, daß es einen sehr hoch, über 2000° liegenden Schmelzpunkt besitzt, so daß Glühlampenfäden aus dieser Materie eine sehr hohe Temperatur annehmen könnten, ohne zu schmelzen. Nach vielen Versuchen gelang es, aus dem Doppelsalz Tantalkaliumfluorid metallisches Tantal von großer Reinheit darzustellen. Dieses erwies sich als ein Metall, welches sich walzen und zu Drähten von großer Feinheit ziehen ließ. Gehämmertes Tantal zeigte sich als ein so harter Körper, daß es von dem Diamant nicht durchbohrt werden konnte, und zugleich als ein so zäher Körper, daß es zu den dünnsten Blechen ausgewalzt werden konnte. Die Chemiker der Fabrik machten darauf aufmerksam, daß dieses Metall daher ein ideales Material für Panzerplatten abgeben würde, wenn nicht sein Preis ein viel zu hoher wäre. Der Schmelzpunkt des reinen Metalls ergab sich bei zirka 2300° C. Das Metall leitet 6mal so gut wie Quecksilber. Da man, wenn auch erst nach mühsamen Versuchen, Drähte von einem Durchmesser von 0,05 bis 0,06 mm ziehen konnte, so mußte zunächst festgestellt werden, wie lang ein Draht von so kleinem Durchmesser sein müßte, um bei 110 Volt eine Lichtstärke von 32 Kerzen zu ergeben, wenn er pro Kerze nur etwa 1,5 Watt Effekt verbrauchen sollte. Es ergab sich die respektable Länge von 700 mm, also mehr als $^2/_3$ Meter, und es ergab sich nun die Aufgabe, einen Draht von solcher Länge in dem Raum einer gewöhnlichen Glühlampenbirne unterzubringen, da selbstverständlich an den gewohnten Abmessungen

der Fassungen, Lüster, Glocken nichts geändert werden durfte. Diese Aufgabe führte auf eine Form der Tantallampe, die in Fig. 449 gezeichnet ist. In der Glasbirne befindet sich ein kurzer Glasstab, der oben und unten eine Glaslinse trägt. In diese sind Tragarme aus Metall eingeschmolzen, oben 11, unten 12, so daß jeder obere Arm mitten zwischen zwei unteren Armen liegt. Die Arme sind nach oben resp. unten gebogen und je am Ende zu Häkchen umgebogen. In diese Träger wird nun der lange Tantalfaden zickzackförmig eingelegt. Seine Enden werden von zwei unteren Armen gehalten und werden dort durch Platinzuführungen mit dem Sockel der Lampen verbunden. Hauptsächlich werden die Lampen bisher für eine Lichtstärke von 25 Kerzen ausgeführt. Sie brauchen um 50 Proz. weniger Strom, wie eine gewöhnliche Glühlampe gleicher Lichtstärke. Ihre Lebensdauer ist weit über 1000 Stunden, wenn sie mit normalem Strom brennen. Während gewöhnliche Glühlampen, wenn sie an einer Stelle durchbrennen, unbrauchbar sind, kommt es bei den Tantallampen vor, daß, wenn der Faden an einer Stelle durchbrennt, er mit seinem Nachbardraht in Berührung kommt und so die unterbrochene Leitung des Stromes wieder herstellt. Eine durchgebrannte Lampe braucht daher gewöhnlich nicht sofort ausrangiert zu werden.

Fig. 449.



Die Osmium- und namentlich die Tantallampen würden wegen ihres viel geringeren Stromverbrauches die gewöhnliche Glühlampe natürlich sofort aus dem Felde schlagen, wenn nicht ihr Preis ein bedeutend höherer, zirka 8mal so hoher wäre, als der von Kohlenfadenlampen. Das ist der Grund, warum die Bäume der neuen Erfindungen nicht zum Himmel wachsen können.

Das elektrische Glühlicht beruht auf der Jouleschen Wärme. Da nun aber ein Draht durch den elektrischen Strom nicht bloß zum Glühen erhitzt wird, so daß er Licht ausstrahlt, sondern da er durch mehr oder minder starke Ströme auf jeden beliebigen Grad erwärmt werden kann,

so lag der Gedanke sehr nahe, diese Joulesche Wärme durch passende Anordnung der Drähte auch zum K o c h e n und H e i z e n zu benutzen, also diese Wärme etwa in Gefäßen zu entwickeln, in welchen man Wasser zum Sieden oder durchströmende Luft für Heizzwecke auf hohe Temperatur bringen will.

Eine nähere Betrachtung ergibt aber zunächst, daß dieser Gedanke, obwohl er nahe liegt, doch gewissen Schwierigkeiten unterliegt, Schwierigkeiten, die sich nicht auf die technische Ausführbarkeit, sondern auf die Ökonomie dieses elektrischen Betriebes beziehen. Die Ökonomie nämlich hängt natürlich ab von dem Preise, zu dem die elektrische Energie geliefert werden kann. Unter normalen Umständen, wenn die elektrischen Ströme von Dynamomaschinen geliefert werden, die durch Dampfmaschinen getrieben werden, ist die elektrische Energie, wie man leicht einsieht, zunächst viel zu teuer für Heizzwecke. Denn in den Dampfmaschinen werden nur etwa 8 Proz. der Verbrennungswärme der Kohlen wirklich in mechanische Arbeit verwandelt, und von diesen 8 Proz. wird auch nur ein Teil, etwa 90 Proz. derselben, durch die von den Dampfmaschinen getriebenen Dynamomaschinen in elektrische Energie verwandelt, die man dann in den Heizapparaten wieder in Wärme umsetzt. Wenn man dieselbe Kohlenmenge, die man zum Betrieb der Dampf- und Dynamomaschinen verwendet hat, direkt in Öfen verbrennen würde, so würde man, auch bei nicht besonders zweckmäßig konstruierten Öfen, etwa 60 Proz. der Verbrennungswärme zur Verfügung haben, also etwa 8mal so viel als bei der indirekten Erwärmung durch den elektrischen Strom. Rationell ist also das elektrische Kochen und Heizen in diesem, zunächst vorliegenden Fall keineswegs.

Die Sachlage wird aber in zwei Fällen anders. Erstens nämlich, wenn die Dynamomaschinen nicht durch Dampfmaschinen oder Gasmotoren getrieben werden, sondern durch Wasserkräfte. Wenn bei diesen die Einrichtung einmal gemacht ist, so ist es ganz gleichgültig in Bezug auf die Kosten, ob man Strom entnimmt oder nicht. Die eigentliche elektrische Energie wird also dann kostenlos geliefert — abgesehen von der in jedem Falle notwendigen Verzinsung des Kapitals — und daher kann auch das Heizen und Kochen dabei rationeller sein. Zweitens aber bürgert sich in denjenigen Städten, in denen der elektrische Strom in großen Zentralstationen erzeugt und überall hingeleitet wird — und das ist jetzt schon eine sehr stattliche Anzahl — die elektrische Heizung sehr rapid aus folgendem Grunde ein. Bei solchen Zentralstationen werden nämlich die Kosten der Anlage und des Betriebes gewöhnlich schon durch die für die Beleuchtung abgegebene Energiemenge gedeckt. Der Preis der elektrischen Energie für andere als Beleuchtungszwecke, also auch für Heizzwecke, wird deswegen sehr viel niedriger normiert und kann es auch schon deswegen werden, weil man eine viel bessere Ausnutzung der gesamten Maschinenanlage erzielt, wenn man sie nicht bloß des Abends, wo sie für die Beleuchtung notwendig ist, sondern auch am Tage in Betrieb nimmt. Und die Benutzung der Apparate zum Kochen und Heizen findet ja in der Hauptsache in den Tagesstunden statt. Es kommt also wesentlich auf die Kosten an, zu welchen man die elektrische *Energie* haben kann, um zu entscheiden, ob es auch ökonomisch ratsam

mit elektrischen Apparaten zu heizen und zu kochen, also indirekt der Jouleschen Wärme statt direkt mit der Wärme der Kohlen oder brennenden Leuchtgases.

an aber die Frage der Ökonomie erledigt ist, so bietet der elektrieb auch in diesem Gebiet eine große Menge Vorzüge, nämder Gefahrlosigkeit, der Reinlichkeit, der steten Betriebsder großen Bequemlichkeit, so daß vermutlich auch hier, n große elektrische Zentralstationen immer mehr einerden, die Elektrizität als Siegerin hervorgehen wird. in einem Leiter fortwährend Wärme entwickelt, solange o handelt es sich nur darum, diese Wärme auf andere Körper tragen, auf die Metallwände von Gefäßen, in denen man Wasser w. kocht, oder auf die Luft eines Zimmers beim Heizen. Dies geschieht dadurch, daß man die sich erwärmenden Drähte mit diesen Körpern in enge Berührung bringt. Wichtig ist natürlich dabei, daß man die Drähte, in denen die Joulesche Wärme erzeugt wird, so anordnet, daß möglichst die ganze Wärme nutzbar verwendet wird. Bevor wir jedoch die Anordnungen besprechen, die wirklich für diese Zwecke getroffen wurden, wollen wir uns über die Größe des erforderlichen Stromverbrauchs ein Urteil bilden.

Die Energie, die ein Strom von gegebener Spannung und gegebener Stromstärke enthält, ist einfach gleich dem Produkt aus der Zahl der Watt, die dieser Strom mit sich führt, und der Zeit, also gleich dem Produkt aus der Zahl der Volt und der Zahl der Ampere und der Zeit. Diese Energie setzt sich in den Drähten in ihrem vollen Betrage in Wärme um und die entwickelte Wärmemenge ist also ebenso gleich dem Produkt aus den Watt und der Zeit. Diese Wärmemenge ist dann, wenn man die Zeit in Stunden rechnet, in Wattstunden ausgedrückt. Nun drückt man aber Wärmemengen gewöhnlich in Kalorieen aus, wobei man unter einer Kalorie diejenige Wärmemenge versteht, durch welche 1 Liter Wasser in seiner Temperatur um 1^0 erhöht wird. Da (nach S. 342) 736 Watt gleich 1 Pferdekraft sind, so sind 736 Wattstunden gleich 1 Pferdekraftstunde. Nun leistet 1 Pferdekraft in jeder Sekunde 75 Kilogrammeter, also in 1 Stunde $3600 \times 75 = 270\,000$ Kilogrammmeter Arbeit, also ist 1 Wattstunde gleich $\frac{270\,000}{736}$ Kilogrammeter, das ist rund 367 Kilogrammeter. Die Physik lehrt aber, daß 1 Kalorie gleich der Arbeit von 427 Kilogrammetern ist. Mithin entspricht eine Wattstunde einer Wärmemenge von $\frac{367}{427} = 0{,}86$ Kalorieen oder eine Kalorie entspricht 1,16 Wattstunden. Um 1 Liter Wasser von 0^0 auf 100^0 zu erwärmen, braucht man 100 Kalorieen, also rund 120 Wattstunden. Berechnen wir also nun, wieviel Watt ein Strom haben müßte, der in 5 Minuten 1 Liter Wasser von Zimmertemperatur (15^0) zum Sieden (100^0) bringen könnte. Zu dieser Erwärmung sind offenbar 85 Kalorieen, also 99 Wattstunden nötig. In Wirklichkeit wird man aber wegen der notwendigen Wärmeverluste nicht bloß 99 Wattstunden, sondern ca. 120 Wattstunden nötig haben. Da diese in 5 Minuten, also in $\frac{1}{12}$ Stunde geleistet werden sollen, so gehört ein Strom mit

dem Effekt $12 \times 120 = 1440$ Watt dazu. Ist der Strom also etwa aus einer Leitung von 110 Volt genommen, so muß er eine Stärke von 13,1 Ampere haben; ist er aus einer Leitung von 60 Volt genommen, so braucht er eine Stärke von 24 Ampere u. s. w. Man sieht aus diesen Betrachtungen, daß ein Strom zur gleichen Wärmeleistung um so größeren Effekt, um so mehr Watt haben muß, in je kürzerer Zeit diese Leistung geschehen soll. Es werden also die Apparate, welche schnelle Erwärmung erzielen sollen, mit viel größeren Stromstärken betrieben werden müssen, als diejenigen, welche langsame Erwärmung, oder nur ein Warmhalten hervorbringen sollen.

Infolgedessen richtet man praktisch die Apparate so ein, daß sie mehrere parallel geschaltete Heizdrähte besitzen, von denen man entweder alle oder einige zu gleicher Zeit vom Strom durchfließen lassen kann. Zu rascher Erwärmung benutzt man sämtliche parallel geschaltete Drähte zu gleicher Zeit, wodurch, da der Widerstand bei Parallelschaltung klein ist, bei gegebener Spannung ein starker Strom und daher erhebliche Joulesche Wärme erzeugt wird. Zu langsamer Erwärmung oder zum bloßen Warmhalten benutzt man nur einige von den parallel geschalteten Drähten oder nur einen. Diese verschiedenartige Verbindung wird gewöhnlich durch Umstecken eines Stöpsels hervorgebracht.

Wenn in den Leitungen, an welche ein Heizapparat angeschlossen werden soll — und auch die Heizapparate werden, wie Glühlampen, Motoren u. s. w., alle parallel geschaltet —, eine bestimmte unveränderliche Spannungsdifferenz herrscht, so ist es leicht, den Widerstand des Drahtes zu bestimmen, der eine bestimmte Erwärmung in bestimmter Zeit hervorbringen soll. Ist z. B. diese Spannungsdifferenz 100 Volt und sollen in dem Apparat in 5 Minuten 300 Kalorieen erzeugt werden, so würde die Rechnung folgendermaßen zu führen sein. Zu 100 Kalorieen braucht man, wie oben erwähnt, abgesehen von den Verlusten, rund 120 Wattstunden, also zu 300 Kalorieen braucht man 360 Wattstunden. Da 1 Watt gleich 1 Volt mal 1 Ampere ist, so braucht man bei der gegebenen Spannung von 100 Volt eine Elektrizitätsmenge von 3,60 Amperestunden. Da diese von dem Strom in dem zwölften Teil einer Stunde geliefert werden sollen, so muß der Strom die Stärke 43,2 Ampere haben. Wir wissen also, daß wir Drähte brauchen, in denen bei 100 Volt Spannung ein Strom von 43,2 Ampere fließt. Folglich muß der Draht, resp. das System von parallel geschalteten Drähten den Widerstand 100 Volt dividiert durch 43,2 Ampere, das ist 2,3 Ohm, haben. Damit sind die Dimensionen des Drahtsystems gegeben. Will man z. B. lauter Drähte anwenden, deren jeder nur 3 Ampere führen soll, so muß man zirka 15 solche Drähte parallel schalten.

Wenn aber die Spannung in den Leitungen nicht ganz konstant gehalten wird — und Schwankungen bis zu 10 Proz. kommen im praktischen Betriebe vor —, so fließen stärkere Ströme durch die Drähte, als wofür sie normiert sind, und die Gefahr liegt vor, daß ein Draht, der zu stark erhitzt wird, dadurch wegschmilzt und die Leitung unterbricht. Man muß deshalb die Drähte so wählen, daß sie durch den normalen Strom nicht zu heiß werden, resp. daß sie ihre Wärme möglichst voll-

ständig abgeben können, und insbesondere muß man schwer schmelzbare Drähte zu diesen Apparaten benutzen.

Man nimmt also zum Teil Drähte aus Nickel oder einer Nickellegierung. Diese aber würden, wenn die Luft zu ihnen Zutritt findet, infolge der hohen Temperatur oxydieren und dadurch abbrennen. Um dies zu verhindern, umgibt man sie mit einer Emailmasse, die der Hitze Widerstand leistet und die den Zutritt der Luft verhindert. Bei den unten beschriebenen Heizapparaten von Helberger werden auf die ein-

Fig. 450.

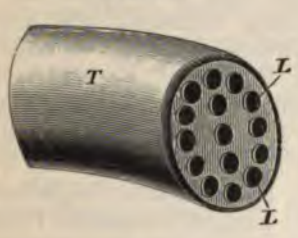
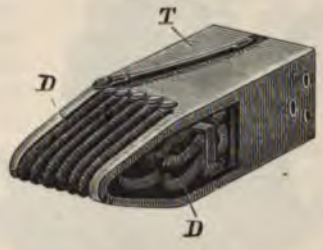


Fig. 451.



zelnen Drähte Glasperlen direkt aufgereiht, um eben die Oxydation zu vermeiden. Andererseits nimmt man aus demselben Grunde als Heizdrähte nicht solche von Nickel, sondern solche aus edlem Metall, insbesondere aus Platin, da diese ja auch bei hohen Temperaturen, bei dauernder Rotglut, nicht oxydieren. Derartig sind die Apparate von Stotz in Stuttgart eingerichtet. Die Platindrähte werden dabei auf eine Asbestschnur aufgewickelt und zwar wird die Anordnung meistens so getroffen, daß jede solche Spirale 1 Ampere aufnehmen kann. Braucht man stärkere Ströme, so werden eben mehrere solche Spiralen parallel geschaltet. Die Drähte werden nun bei diesem System in Tonkörper eingebettet, welche in diejenigen Formen gebracht werden, wie sie zu dem betreffenden Apparat passen. Fig. 450 zeigt ein Stück eines gebogenen Tonkörpers T mit den Löchern L L zur Aufnahme der Drähte. Fig. 451 zeigt einen anderen Tonkörper, auf welchem die Drähte D D schon angebracht sind. Für Apparate, welche sehr viel Wärme entwickeln sollen, ist die Anwendung des Platins allerdings zu kostspielig und die Platindrähte werden dann durch Drähte aus einer Nickellegierung ersetzt, jedoch so, daß die Temperaturerhöhung der Drähte keine zu große wird.

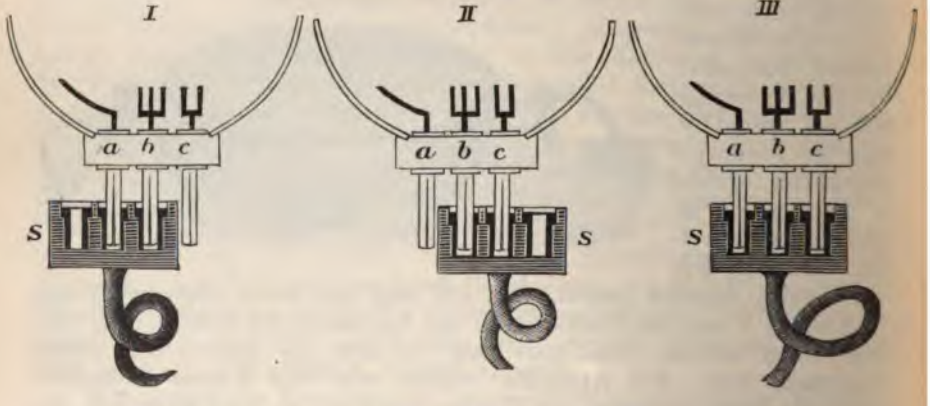
Fig. 452.

Diese Tonkörper mit ihren Drähten, welche als Heizkörper bezeichnet werden, werden nun in die betreffenden Gefäße eingeschlossen, welche erwärmt werden sollen. So zeigt Fig. 452 einen Rechaud, Fig. 453 einen Wasserkessel. Die Heizkörper befinden sich in dem Boden der

Gefäße, so daß die Drähte möglichst nahe an den Heizflächen sich befinden. An jedem Apparat gehen von den Heizdrähten Stifte nach außen, in welche ein Kontakt paßt (der in den Fig. 452 und 453 angesteckt ist). Dieser Kontakt wird durch eine Leitungsschnur an die Zimmerleitung angeschlossen. Um die Erwärmung der Apparate regulieren zu können, sind immer mehrere Heizdrähte getrennt im Apparat so angeordnet, daß sie nach Belieben alle oder einzeln oder in Gruppen zur Verwendung kommen. Die Art der Ausführung dieser Schaltungen zeigt Fig. 454. Es befindet sich nämlich in dem Heizgefäß erstens eine Leitung, welche bei a anfängt und in dem Mitteldraht von b aufhört, zweitens eine Doppelleitung (zwei parallel geschaltete Drähte), welche bei c anfangen und in den beiden äußeren Linien in b enden. Wird nun der dreiteilige Stöpsel S so gesteckt wie in Fig. I, so geht der Strom nur durch die eine Leitung a b, die Erwärmung ist schwach; wird er so gesteckt wie in II, so geht der Strom durch die Doppelleitung c b, die Erwärmung ist eine mittlere, und wird er endlich so gesteckt wie in III, so geht der Strom sowohl von a als von c nach b, die Erwärmung ist eine starke.

Fig. 453.

Fig. 454.



Ähnliche Einrichtungen sind auch bei den Apparaten von Helberger in München zur Regulierung getroffen. Die Heizdrähte werden bei diesen Apparaten, von denen z. B. Fig. 455 einen Inhalationsapparat zeigt, so angeordnet, daß sie, durch aufgereihte Glasperlen isoliert, direkt in Rinnen gelegt sind, die im Innern der Gefäße an den passenden Stellen eingeschnitten sind.

Ganz anders in der Konstruktion sind die zuerst durch die Gesellschaft „Prometheus“ in Frankfurt a. M. hergestellten elektrischen Kochapparate. Bei diesen wird die Heizwirkung auf eigentümliche und sehr zweckmäßige Art erzeugt.

Fig. 455.

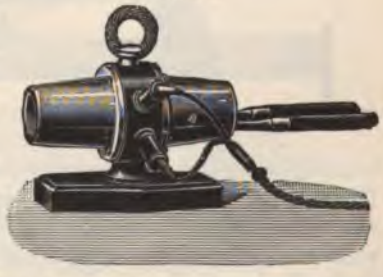
Es werden nämlich nicht eingelagerte Drähte durch den Strom erhitzt, wie bei den oben angeführten Apparaten, sondern die Kochgefäße werden mit einer (schneckenförmig angeordneten) sehr dünnen Metallschicht aus edlem Metall (Silber) versehen, welche auf einer isolierenden Unterlage, Emaille oder Glimmer, eingebrannt ist. Die Emaille befindet sich auf der Außenseite des Kochgefäßes, so daß die in den Metallstreifen entwickelte Hitze sich fast ganz dem Innern des Gefäßes mitteilt. Das Kochgefäß wird außen mit einer Hülle umgeben, damit die blanken Metallstreifen nicht frei liegen. Eine Ansicht eines solchen Kochgefäßes mit drei gewundenen Metallstreifen, die verschiedenartig geschaltet

Fig. 456.

Fig. 457.

werden können, zeigt Fig. 456. In Fig. 457 sieht man das Äußere des Gefäßes mit den drei Kontakten a b c. Fabrikationsmäßig wird die dünne Silberschicht durch Einbrennen auf Glimmerstreifen hergestellt und die versilberten Glimmerstreifen sind dann die einzelnen Heizkörper, welche beliebig zusammengesetzt werden. Die Streifen können sowohl rechteckig wie ringförmig sein, so daß sie sich allen Apparatformen leicht anschließen. Der Nutzeffekt dieser Apparate, die ebenfalls für alle Zwecke des Hauses und der Küche hergestellt werden, ist infolge der Konstruktion ein sehr hoher. Fig. 458 zeigt einen Brennscheerenwärmer von Prometheus mit ringförmigen Glimmerheizkörpern.

Fig. 458.



Solche Heizapparate der verschiedenen Konstruktionen werden nun nicht bloß für die Küche im kleinen und großen gefertigt, von der einfachen elektrischen Pfanne an bis zum vollständigen elektrischen Herd, sie werden auch für industrielle Zwecke, als Leimkocher, Siegellackkocher, Abdampfschränke, Brennstempel, Ver-

goldepressen, Satinierapparate u. s. w. hergestellt und zeichnen sich überall durch besondere Bequemlichkeit, Reinlichkeit und Gefahrlosigkeit aus.

Um einen Anhalt über die Leistungsfähigkeit und den Stromverbrauch dieser Apparate zu erhalten, sei angeführt, daß eine Bratpfanne Ströme von 4, 8, 12 Ampere erhält, je nach der Schaltung, wobei immer eine Spannung von 100 Volt angenommen ist; ein Teekessel, mit 5, 4 oder 1 Ampere betrieben, bringt bei der größten Stromstärke 1 Liter Wasser in 15 Minuten zum Sieden; bei dem Inhalationsapparat, der 2 Ampere braucht, siedet das Wasser in 5 Minuten; ein Bratrost, mit 6 Ampere betrieben, ist in 5 Minuten zum Braten fertig, ebenso ist der Brennscherenwärmer, der 1 Ampere Strom braucht, in 5 Minuten zum Gebrauch fertig.

Fig. 459.

Außer für solche Kochzwecke läßt sich aber die Joulesche Wärme auch zum Heizen von Zimmern oder Trambahnwagen verwenden. Zu dem Zweck werden die Heizkörper in die Form von Öfen gebracht, an denen sich die Luft des Zimmers erwärmen kann. So zeigt Fig. 459 einen elektrischen Ofen von Helberger, der transportabel ist und in jedem Zimmer durch eine Leitungsschnur mit der elektrischen Leitung verbunden werden kann. Die Regulierung auf verschiedene Stromstärken, also verschiedene Erwärmung, geschieht hier durch Drehung des vorn oben sichtbaren Kontaktrades, welches die betreffenden Schaltungen vornimmt. Ein solcher Ofen wird in 5 Abstufungen mit 10 bis 50 Ampere (bei 100 Volt) betrieben und genügt zum Heizen eines Raumes bis zu 100 Kubikmeter Inhalt. Allgemein kann man rechnen, daß man, um einen Raum um 10^0 zu erwärmen, pro Kubikmeter etwa 37 Watt nötig hat. Bei den Öfen dieser Form geschieht die Erwärmung hauptsächlich durch die Zirkulation der Zimmerluft durch den Ofen hindurch. Die kalte Luft dringt von unten in den Ofen hinein, die warme strömt oben ab. Wo es nicht auf elegante Formen ankommt, kann man auch einfache Heizregister anwenden, wie Fig. 460 eines zeigt. Die Drähte sind dabei einfach auf feuerfeste Masse aufgewunden, ein Mantel ist nicht angebracht. Man kann beliebig viele solche Register zusammenstellen. Man kann aber den Öfen leicht auch sehr geschmackvolle Formen geben, wie es der Ofen von Stotz Fig. 461 zeigt. Er hat die Form eines gewöhnlichen, fein verzierten Ofenschirmes, ist aber selbst der Ofen im ganzen. Der mittlere flache Teil enthält die Heizkörper und wird durch die in der Figur sichtbare Schnur an die Leitung angeschlossen. Ein solcher Ofen braucht ungefähr 2000 Watt, also bei 100 Volt etwa 20 Ampere, um ein mittelgroßes Zimmer zu erwärmen.

Fig. 460.

Die elektrischen Öfen haben auch vielfachen Eingang gefunden zur

Heizung von elektrisch betriebenen Trambahnwagen. Dort ist ja Strom im Wagen vorhanden und der Ofen kann also leicht von diesem Strom betrieben werden. Die Öfen werden, wie es der in Fig. 462 abgebildete

Fig. 461.

Trambahnheizkörper der A.E.G. zeigt, in niedriger, langer Form ausgeführt, damit sie unter den Sitzbänken Platz haben. Sie sind aus feuerfestem Material gebaut wie das Register von Fig. 460 und mit einem durchlochten Mantel umgeben, durch den die Luft zirkulieren kann.

Besonders vorteilhaft erweist sich die elektrische Heizung für Schaufenster, um im Winter die Eisbildung an diesen zu verhindern. Andere

Fig. 462.

Heizapparate kann man wegen der Feuersgefahr dabei nur in Ausnahmsfällen anbringen. Die elektrischen Schaufensterwärmer, von denen

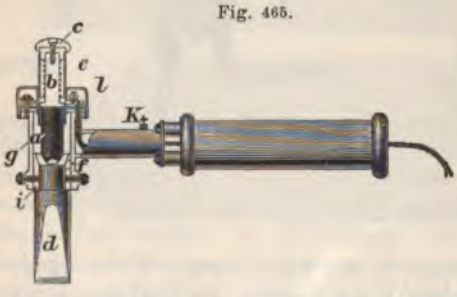
Fig. 463.

Fig. 463 einen der A.E.G. zeigt, werden niedrig ausgeführt und brauchen etwa 330 Watt zu ihrem Betriebe.

Für manche Heizzwecke, namentlich wenn es sich um rasch hervorzubringende hohe Temperaturen handelt, sind die bisher beschriebenen Apparate, die auf der Erzeugung Joulescher Wärme in Metalldrähten oder Metallstreifen beruhen, nicht besonders geeignet, weil bei den hohen zu erzielenden Temperaturen ein Abschmelzen oder Abbrennen der Drähte nicht ausgeschlossen ist. In diesen Fällen wird zuweilen mit Vorteil die Heizung durch den elektrischen Lichtbogen angewendet. Ein zweckmäßiger derartiger Apparat ist der Lötkolben mit Lichtbogenheizung, den die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin konstruiert und der in Fig. 464 in der Ansicht, in Fig. 465 im Durchschnitt gezeichnet ist. Durch eine Leitungsschnur mit Stöpsel wird dem Apparat Strom aus einer Leitung von 65 oder 100 Volt zugeführt. Der Kupferkolben d, der direkt zum Löten dient, bildet den positiven Pol, die

Fig. 464.

Fig. 465.



Kohle a den negativen Pol. Durch einen Druck auf den Knopf c bringt man die Kohle mit dem Kupferpol in Berührung. Beim Loslassen des Knopfes springt dieser und mit ihm die Kohle infolge der Spannung der Feder e um ca. 1 mm zurück und es bildet sich der Lichtbogen, der das positive Kupfer rasch und stark erhitzt. Durch ein kleines Loch bei f kann man den Lichtbogen beobachten. Ist die Kohle zu weit abgebrannt, so daß der Lichtbogen erlischt, so kann man ihn durch einen erneuten Druck auf den Knopf c wieder herstellen, was zirka jede halbe Stunde erforderlich ist. In ähnlicher Weise wendet man den Lichtbogen auch für elektrische Bügeleisen an.

Der elektrische Lichtbogen wird auch zum Betriebe elektrischer Öfen, aber nicht elektrischer Heizöfen, sondern elektrischer Schmelzöfen, benutzt und hat dafür sogar ganz besondere, sonst unerreichbare Eigenschaften. Da jedoch diese elektrischen Öfen bisher fast allein für chemische Zwecke verwendet werden, so wollen wir diese erst im Kap. 11, welches von der Elektrochemie handelt, besprechen.

7. Kapitel.

Die Arbeitsleistung durch Elektromotoren.

Die elektrische Beleuchtung war es zwar, welche den Anstoß zu der erfolgreichen Entwicklung der Elektrotechnik gab. Das Bedürfnis nach billigen und starken Strömen führte zu der Konstruktion der dynamoelektrischen Maschinen in immer größerer Vervollkommnung. Bald jedoch ergab sich eine Anwendung dieser starken Ströme zu Zwecken, deren Bedeutung eine viel größere ist, als sie die elektrische Beleuchtung erlangen kann, nämlich zur Erzeugung von mechanischer Bewegung, also zur Leistung von Arbeit, zur Verwandlung der Energie der elektrischen Ströme direkt in mechanische Arbeit.

Eine jede dynamoelektrische Gleichstrommaschine läßt sich in doppelter Weise verwenden. Wenn man den Anker derselben durch Aufwendung von Arbeit vor den Magnetpolen dreht, so erzeugt man in ihm Induktionsströme, und dies ist die ursprüngliche Verwendung der Maschinen. Wenn man aber andererseits durch die Bürsten in die Drahtwindungen der Maschine irgend einen elektrischen Strom schickt, so üben ja die Magnete auf den Strom im Anker Kräfte aus, und unter dem Einfluß dieser Kräfte müssen sich die Stromleiter, d. h. der Anker, bewegen. Wenn man also einen Strom von außen durch die Drahtwindungen des Ankers und der Magnete sendet, so muß der Anker sich drehen.

Man hatte schon lange versucht, diese elektromotorischen Kräfte zur Leistung von Arbeit zu benutzen. Jacobi in Petersburg brachte eine solche, wie man sie damals nannte, „elektromagnetische Maschine“ (d. h. eine Maschine zur Erzeugung von Bewegung durch elektrische Ströme) in ein Boot, dessen Rad er mit der Achse des rotierenden Ankers in Verbindung gesetzt hatte, und ließ nun die Maschine durch eine große galvanische Batterie treiben. Die Maschine bewegte sich natürlich und trieb das Boot auf der Newa mit mäßiger Geschwindigkeit. Aber es war klar, daß eine solche Anwendung der Elektrizität zur Leistung von Arbeit nicht vorteilhaft sein konnte, denn es mußte ja in den Batterieen Zink verbrannt werden, und wir haben auf S. 402 gesehen, daß die Erzeugung elektrischer Energie, von welcher ja die nutzbare Arbeit abhängt, durch Verbrennung von Zink etwa 15mal so viel Kosten verursacht, als durch Verbrennung von Kohlen. Es ist also unbedingt vorzuziehen, ein Boot durch Dampf treiben zu lassen, als durch Elektrizität, wenn man diese durch Oxydation von Zink erzeugen muß.

Ganz anders aber stellt sich die Angelegenheit, wenn man starke elektrische Ströme billig zur Verfügung hat, sei es direkt aus Dynamomaschinen oder indirekt aus geladenen Akkumulatoren. Mit solchen Strömen ist es sehr wohl möglich, ökonomisch und in sehr bequemer Form Arbeit zu leisten.

Wenn man also in eine Gleichstrommaschine von außen her einen elektrischen Strom einführt, so kommt ihr Anker in Drehung und kann Arbeit leisten. Woher man den Strom nimmt, den man in sie einleitet, ist ganz gleichgültig. Man kann ihn direkt aus einer Dynamomaschine nehmen; man kann den Strom aber auch aus Akkumulatoren oder aus galvanischen Elementen nehmen, wenn es die Ökonomie erlaubt und sonstige Rücksichten erfordern, oder man kann ihn endlich bei Stromverteilung durch Zentralstationen (s. Kap. 9) direkt aus der Leitung entnehmen. Das wesentlich Arbeitleistende ist also der elektrische Strom, und das Mittel, durch welches seine Energie in mechanische Arbeit verwandelt wird, ist die Dynamomaschine, die man deshalb auch *als elektrischen Motor* oder *Elektromotor* bezeichnet.

Ein elektrischer Motor, welcher durch einen Strom getrieben wird, kann also Arbeit leisten. Wenn man seine Achse durch Riemen oder Zahnräder oder auf irgend eine andere Weise mit der Welle einer Maschine in Verbindung setzt, die man treiben lassen will, so wird diese gedreht, und auf diese Weise leistet der Elektromotor Arbeit. Er tut es dadurch, daß ihm von der Elektrizitätsquelle elektrische Energie zugeführt wird.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, unterscheiden sich die Gleichstrommotoren in nichts von den Gleichstromdynamos zur Erzeugung von Strömen. Je nachdem man eine solche Gleichstrommaschine durch äußere Kraft oder durch einen eingeleiteten Strom dreht, erzeugt sie im ersten Fall Ströme, im zweiten Fall Arbeit. Wir können, um diese Umkehrbarkeit schärfer auszusprechen, dies auch so fassen: *Eine Dynamomaschine verwandelt mechanische Energie in elektrische oder elektrische Energie in mechanische. Leitet man mechanische Energie in sie hinein, so gibt sie elektrische Energie heraus, leitet man elektrische Energie in sie hinein, so gibt sie mechanische Energie heraus.*

Da also in der Konstruktion kein Unterschied zwischen Dynamos (Generatoren) und Motoren für Gleichstrom besteht, so sind alle die einzelnen Typen von Gleichstromdynamos, die wir auf S. 373 bis S. 377 beschrieben haben, ebenso als Motoren wie als Generatoren zu benutzen. Wir werden im folgenden bei den Einzelmaschinen solche Gleichstrommotoren abgebildet sehen, brauchen sie also hier nicht darzustellen.

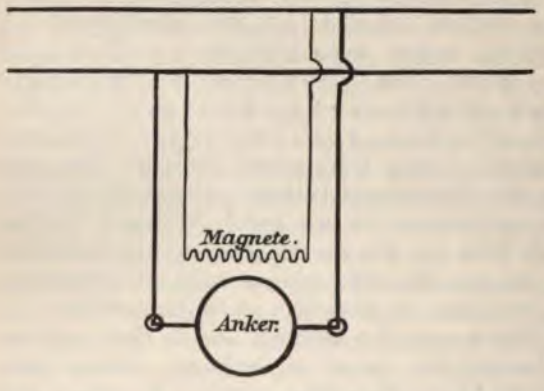
Wenn ein elektrischer Strom von den Bürsten aus in einen solchen Motor gesendet wird, so kommt der Anker in Drehung. Durch diese Drehung entsteht aber in dem Anker (dem Ring oder der Trommel) eine elektromotorische Kraft, welche für sich selbst einen Strom in entgegengesetzter Richtung nach außen senden würde, wie aus dem Lenzschen Gesetz (S. 212) sich ergibt. Die äußere elektromotorische Kraft, die den Strom in die Maschine sendet, muß also größer sein als diese gegenwirkende elektromotorische Kraft. Die gesamte Energie, welche der Motor *pro Sekunde* aufnimmt, ist nun, wie immer, gleich dem Produkt aus der Stromstärke und der Klemmenspannung an seinen Enden. Diese Energie verbraucht er zum Teil in sich, nämlich für Reibung und Joulesche Wärme, also als sogenannte *Leerlaufsarbeit*, zum anderen Teil kann er sie an äußere Maschinerieen als Arbeit abgeben. Er kann also eine Arbeit

leisten, die, bis auf diese Leerlaufsarbeit, gleich dem Produkt aus seiner Klemmenspannung, seiner Stromstärke und seiner Geschwindigkeit, also seiner Tourenzahl ist. Wenn er immer dieselbe Arbeit leisten soll, so muß dieses Produkt immer gleich sein; soll er eine größere oder eine geringere Arbeit leisten, so muß dieses Produkt größer oder kleiner werden. Die Motoren werden nun entweder so benutzt, und das ist bisher der häufigste Fall, daß sie an die Leitung eines elektrischen Netzes, welches von einer Zentralstation auf gleicher Spannung erhalten wird, angeschlossen werden, oder sie werden in besonderen Kraftübertragungsanlagen benutzt. Diesen letzteren Fall werden wir im folgenden Kapitel besonders besprechen. Hier wollen wir also annehmen, daß die Elektromotoren an Leitungen angeschlossen sind, bei denen die Klemmenspannung stets konstant erhalten wird.

Die elektrischen Motoren, welche durch Gleichströme getrieben werden, können natürlich ebenfalls wie die stromerzeugenden Gleichstrommaschinen in dreifach verschiedener Schaltung ausgeführt werden, nämlich als Hauptstrommotoren, Nebenschlußmotoren und Motoren mit gemischter Schaltung. Die letzteren werden aber fast gar nicht verwendet.

Am vorteilhaftesten hat sich für Arbeitsleistungen bei konstanter Klemmenspannung der Nebenschlußmotor erwiesen. Wenn ein solcher an die beiden Leitungen angelegt wird, zwischen denen die gegebene Spannungsdifferenz herrscht, so ist, wie Fig. 466 zeigt, sowohl der Anker, als die Magnetbewicklung mit diesen Leitungen verbunden. Daraus folgt zunächst, daß in der Magnetbewicklung immer ein Strom von derselben Stärke fließt, wie groß oder wie klein auch die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers sein möge. Also ist das Magnetfeld des Motors dauernd dasselbe. Die elektromotorische Gegenkraft, die der Motor erzeugt, ist nun abhängig, wie immer bei Induktionsströmen, von der Stärke des Magnetfeldes, der Windungszahl auf dem Anker und der Geschwindigkeit (Tourenzahl) desselben. Und da die elektromotorische Gegenkraft stets, bis auf den Spannungsverlust im Inneren des Motors, so hoch wird, wie die äußere Spannung, welche ihn treibt, so sieht man, daß der Motor immer nahezu dieselbe Tourenzahl behalten muß, ob er nun mit Belastung oder ohne dieselbe, also leer, läuft. Denn da die Spannung, die Windungszahl und das Magnetfeld ungeändert bleiben, so muß auch die Tourenzahl dieselbe bleiben. Das Resultat ist also, daß bei verschiedenen Belastungen, bei verschieden großen Arbeiten, die der Nebenschlußmotor zu leisten hat, die Touren-

Fig. 466.



zahl nahe immer dieselbe bleibt, solange das Magnetfeld nicht geändert wird, und daß nur der Anker je nach der geleisteten Arbeit von verschieden starken Strömen durchflossen wird, von um so stärkeren, je größer die geleistete Arbeit ist. Daraus folgt zunächst, daß der Motor, bis auf die Leerlaufsarbeit, immer gerade so viel Energie von außen, von der Leitung aufnimmt, als er Arbeit leistet. Bei halber Arbeit nimmt er bloß die halbe Energie auf, wenn die Leerlaufsarbeit zunächst unberücksichtigt bleibt. Die aufgenommene Arbeit drückt sich ja zuletzt in den Kosten der Kohlen aus, welche zu ihrer Erzeugung benutzt werden.

Damit nun der Motor recht große Kraft, namentlich beim Einschalten, also beim Anlauf, entwickle, auch wenn er belastet ist, also wenn eine Arbeitsmaschinerie an ihm hängt, ist es notwendig, sein Magnetfeld recht stark zu machen und den Widerstand des Ankers möglichst klein zu halten, damit die in ihm erzeugten Ströme recht stark werden.

Wenn aber die Elektromotoren einen sehr kleinen Ankerwiderstand haben, so treten bei dem Anschluß derselben an die Stromleitungen zunächst Übelstände auf. Nehmen wir an, ein solcher Motor habe den Widerstand von 1 Ohm und er werde zwischen zwei Leiter geschaltet, die 100 Volt Spannungsdifferenz haben, so würde im ersten Moment ein Strom von 100 Ampere durch die Drahtwindungen fließen. Der Anker würde sich zwar sofort in Bewegung setzen und dadurch einen Gegenstrom erzeugen, der die 100 Ampere bald auf 50, 20 u. s. w. Ampere hinunter bringen würde, aber es würde gewöhnlich gar nicht dazu kommen; denn durch den ersten momentanen starken Strom würden die Drähte des Ankers und ihre Isolierung beschädigt werden oder mindestens würde die Sicherung (oben S. 475) durchschmelzen. Und selbst wenn das nicht der Fall wäre, wenn alle Maße so genommen werden, daß das nicht eintreten würde, so würde doch durch die plötzliche starke Stromentnahme aus dem Netz dieses in Störung geraten, die Spannung würde plötzlich sinken. Diese Umstände verlangen, daß die Elektromotoren, und namentlich die größeren, nicht auf einmal, sondern allmählich in den Stromkreis eingeschaltet werden. Dazu braucht es zunächst weiter nichts, als einen Vorschaltwiderstand, so daß der Strom erst durch einen großen Widerstand geht und dadurch schwach wird; wenn der Anker sich dann dreht und Gegenstrom erzeugt, dann wird der Widerstand allmählich verringert und schließlich kurz geschlossen, so daß der Motor allein im Stromkreis ist. Ein solcher Anlasser ist z. B. durch Fig. 467 dargestellt. Dabei werden bei größeren Motoren zuerst die Magnete eingeschaltet und dann allmählich der Anker. Die sogenannten Stufenschalter besorgen dieses Anlassen in Stufen.

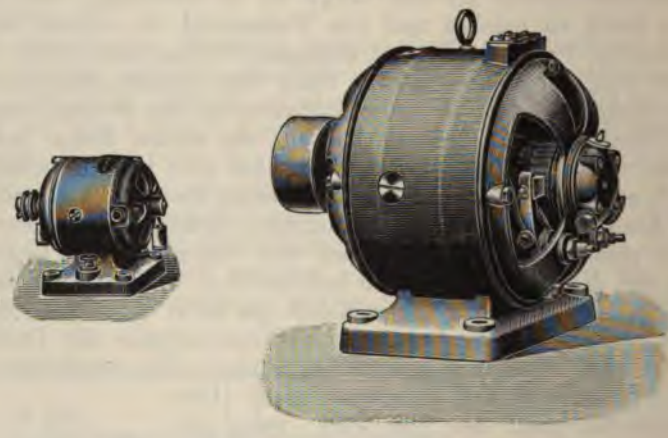
Fig. 467.

Die kleineren Motoren, von $^1/_{60}$ bis zu 2 Pferdekräften Leistung, werden jetzt von den großen elektrischen Gesellschaften in großen Mengen hergestellt, wodurch ihr Preis auch ein sehr geringer ist. Die äußere Form dieser Kleinmotoren ist bei allen Fabriken eine ähnliche geworden.

Der drehbare Anker wird meistens durch ein Gehäuse vor Verunreinigung geschützt. Fig. 468 zeigt solche Motoren für $^1/_{60}$ und $^1/_2$ Pferdekraft im Verhältnis von 1 : 7 verkleinert.

Während so der Nebenschlußmotor bei jeder Leistung dieselbe Tourenzahl besitzt — eine Eigenschaft, die bei vielen Betrieben sehr geschätzt, ja notwendig ist —, ist es natürlich andererseits auch möglich, die Tourenzahl des Motors zu ändern, und zwar dadurch, daß man eben die Stärke des Magnetfeldes ändert. Dazu braucht man bloß in die Magnetbewicklung einen Nebenschlußregulator einzuschalten. Bei gleichgehaltener äußerer Spannung muß dann der Motor um so rascher rotieren,

Fig. 468.



damit er dieselbe Gegenkraft erzeuge, je schwächer das Magnetfeld ist. Einschalten von Widerstand in die Magnetbewicklung erhöht also die Tourenzahl des Motors.

Wenn man dagegen einen Hauptstrommotor an zwei Leitungen von gegebener Spannungsdifferenz anlegt, so ist die Stärke des Magnetfeldes nicht immer dieselbe, sondern wenn der Motor von einem stärkeren Strom durchflossen wird, ist auch das Magnetfeld stärker, und umgekehrt bei schwächerem Strom im Anker ist auch das Magnetfeld schwächer. Denn Anker und Magnetbewicklung werden dabei immer von demselben Strom durchflossen. Daraus folgt, daß ein solcher Motor nicht immer dieselbe Tourenzahl behalten kann. Hat er große Arbeit zu leisten, so ist sein Strom im Anker stark, daher auch das Magnetfeld stark und er läuft daher langsam. Hat er wenig Arbeit zu leisten, so läuft er rasch. Bei elektrischen Straßenbahnen benutzt man gewöhnlich Hauptstrommotoren. Diese gehen daher von selbst, ohne daß man irgendwie reguliert, auf Kurven und bei Steigungen langsamer als auf gerader Straße. Weiter aber folgt aus der Veränderlichkeit des Magnetfeldes, daß die Anzugskraft des Hauptstrommotors eine bedeutend größere ist, als die eines Nebenschlußmotors. Denn wenn der Hauptstrommotor mit starker Belastung plötzlich an die Spannung angelegt wird, so wird im ersten Moment der Strom im Anker und in der Magnetbewicklung sehr

stark, so daß die Kraft, mit welcher der Anker sich dreht, eine sehr große ist, die auch die große Belastung leicht überwinden kann. Deshalb werden gerade bei elektrischen Trambahnen und Automobilen Gleichstrommotoren gern angewendet.

Während man so ohne Schwierigkeit mittels Gleichströmen durch Maschinen jeder Art Arbeit leisten lassen konnte, schien es lange Zeit unmöglich zu sein, dasselbe auch mit Wechselströmen zu erreichen, und es schien, daß die Wechselströme gerade dadurch wesentlich in ihrer Brauchbarkeit hinter den Gleichströmen zurückbleiben müßten, weil eben diese Arbeitsleistung unmöglich oder wenigstens nicht vorteilhaft und einfach möglich sei.

Dieser Mangel der Wechselströme wurde aber auf unerwartete Weise beseitigt, indem man lernte, zuerst durch Drehströme, dann aber auch nach demselben Prinzip durch gewöhnliche Wechselströme gute Motoren herzustellen.

Es war eine höchst bedeutsame Erfindung, als durch Ferraris und Tesla gezeigt wurde, daß man zwei oder mehr Wechselströme mit verschiedener Phase, also die Mehrphasenströme (S. 261), in sehr einfacher Weise zur Erzeugung von mechanischer Arbeit aus elektrischer Energie verwenden könne. Von allgemeiner Bedeutung wurde diese Methode erst, seit (1891) die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin und die Maschinenfabrik Oerlikon Wechselstrommotoren nach diesem System bauten und ihnen den bezeichnenden Namen Drehstrommotoren gaben. Seit dieser Zeit werden derartige Motoren von vielen Fabriken in verschiedener Ausführung gebaut.

Das Prinzip derselben ist folgendes: Die von einer primären Drehstrommaschine (S. 389) herkommenden drei Wechselströme verschiedener Phase werden in drei Gruppen um einen festen Eisenring geführt, so zwar, daß der erste Wechselstrom zwei diametral einander gegenüberliegende Spulensysteme durchläuft, der zweite zwei andere ebensolche, die um 60^0 von den ersten abstehen, der dritte zwei weitere, die wieder um 60^0 von diesen abstehen. Nach dem früher (S. 260) Gesagten wird dann innerhalb des Ringes ein Magnetfeld gebildet, dessen Achse sich fortwährend verschiebt, sich innerhalb des Ringes fortwährend im Kreise herumdreht, und zwar mit derselben Periode, welche die Wechselströme haben, es entsteht ein sogenanntes magnetisches Drehfeld. Im Innern des festen Ringes befindet sich nun ein eiserner Anker, der Drahtwindungen trägt, die einfach in sich geschlossen sind. Dieser Anker kann als Ringanker gewickelt sein, ist aber meistenteils als Trommelanker gewickelt. In den Drahtwindungen entstehen nun durch die Induktion von den vorbeilaufenden Polen Induktionsströme und durch die Wechselwirkung zwischen den Polen und den Strömen fängt der Anker an, sich zu drehen. Der Anker würde auch rotieren, wenn er keine Drahtwindungen besäße, wegen der Anziehung zwischen den Polen und den Foucaultschen Strömen. Man zieht aber vor, den Anker mit Drahtwindungen zu versehen (es können auch Kupferstäbe direkt in das Eisen hineingelegt werden), um den Induktionsströmen, die im Kupfer natürlich viel stärker sind als im Eisen, vorgeschriebene und zwar die günstigsten Bahnen zu geben. Von solchen

Drehstrommotoren zeigt Fig. 469 eine Abbildung, einen Motor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin. Man sieht das Eisengehäuse, an welchem innen die Wicklungen für den zugeführten Drehstrom angebracht sind. In Fig. 470 sieht man den Anker besonders abgebildet, eine Reihe von Kupferstäben auf einem Zylinder, durch zwei Metallringe verbunden. Einen solchen Anker bezeichnet man als Kurzschlußanker. Zuvörderst erkennt man eine Besonderheit bei diesen Motoren. Der bewegliche Teil, der Anker mit seinen Windungen, braucht gar keinen Kollektor, keine Schleifringe, keine Bürsten, wie bei den Gleichstrommotoren, sondern die Ströme im beweglichen Teil werden direkt von denen im festen Teil induziert. Das ist zunächst ein großer Vorzug in Bezug auf die Haltbarkeit der Motoren und die Einfachheit der Bedienung. Denn der Kollektor mit den Bürsten ist der empfindlichste Teil bei allen Gleichstrommotoren. Bei diesen Drehstrommotoren wird also die Achse des Ankers in gewöhnlicher Weise mit den Arbeitsmaschinen verbunden und durch dessen Rotation sind sie imstande, Arbeit zu leisten. Sie sind daher die einfachsten Motoren, die man sich denken kann, einfacher selbst als die Gleichstrommotoren, so daß damit die Arbeitsleistung durch Wechselströme einen großen Fortschritt gewonnen hat. Da die Ströme im Anker nur durch Induktion entstehen, nicht zugeleitet werden, so bezeichnet man diese Motoren allgemein als Induktionsmotoren.

Fig. 469.

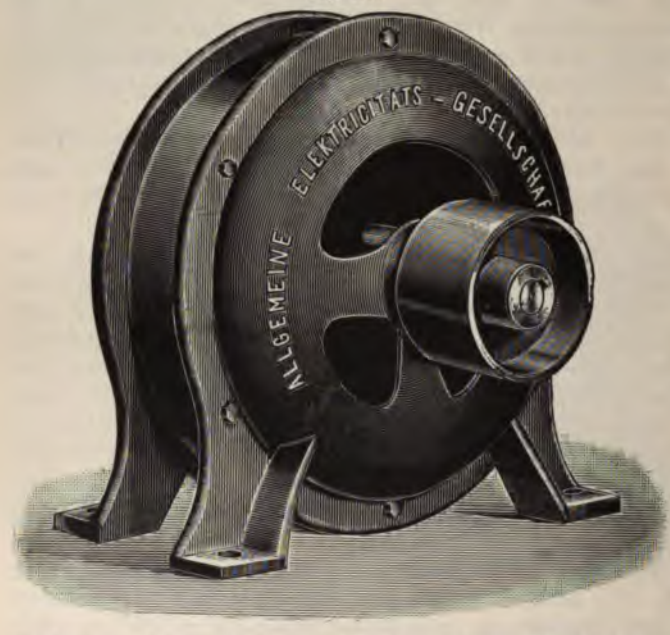
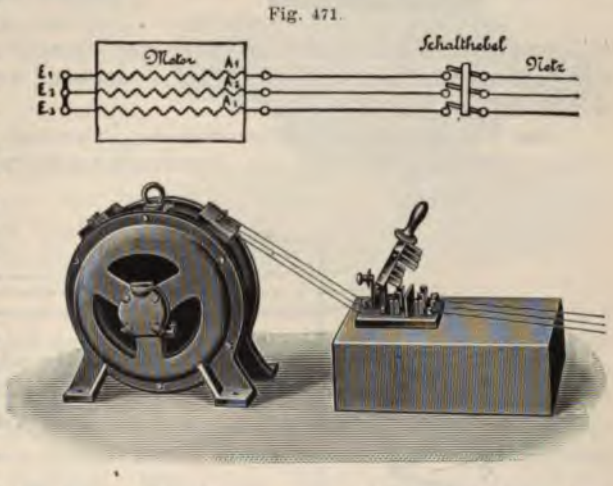


Fig. 470.

Wenn der Anker keine äußere Arbeit zu leisten hat, so rotiert er immer rascher, bis er nahezu dieselbe Geschwindigkeit hat wie die Pole selbst, die im festen Ring herumlaufen. Würde er diese Geschwindigkeit ganz erreichen, so würden aber keine Ströme mehr induziert werden, weil keine relative Bewegung zwischen den Polen und den Stromleitern exi-

stieren würde. Sowie aber aus irgend einem Grunde die Geschwindigkeit des Ankers nachläßt, werden Ströme induziert. Wird nun der Motor belastet, d. h. wird seine Achse mit einer Maschine verbunden, bei der er Arbeit zu leisten hat, so wird seine Geschwindigkeit kleiner und nun leistet er die Arbeit. Diese Änderung der Geschwindigkeit zwischen Leerlauf und Belastung ist aber bei gut gebauten Maschinen sehr gering. Sie beträgt höchstens 10 Proz. Es werden eben schon bei geringem Unterschied in den Geschwindigkeiten starke Kräfte zwischen den Polen und den Strömen erzeugt. Dieser geringe Unterschied zwischen der Geschwindigkeit beim Leerlauf und bei voller Belastung bewirkt natürlich, daß ein Drehstrommotor immer nahezu dieselbe Geschwindigkeit hat, wie die Pole, die im festen Ring herumlaufen. Aber eben nur nahezu. Der Motor kann prinzipiell an Geschwindigkeit hinter dieser beliebig zurückbleiben; es braucht keine Gleichzeitigkeit, kein Synchronismus zwischen der Bewegung der Dynamomaschine und der des Motors zu herrschen, er ist also ein asynchroner Motor. Daß er nur wenig zurückbleibt, liegt eben daran, daß er dann schon die genügende Arbeit leistet. Den Unterschied der Geschwindigkeit des Ankers gegenüber der Geschwindigkeit, mit der die Pole im Gehäuse umlaufen, bezeichnet man als die Schlüpfung des Motors.

Fig. 471.



Ein solcher Motor wird, wie Fig. 471 zeigt, direkt an die drei Leitungen angelegt, die von der Drehstromdynamomaschine kommen, unter Zwischenschaltung eines Schalthebels, um den Strom ein- und ausschalten zu können.

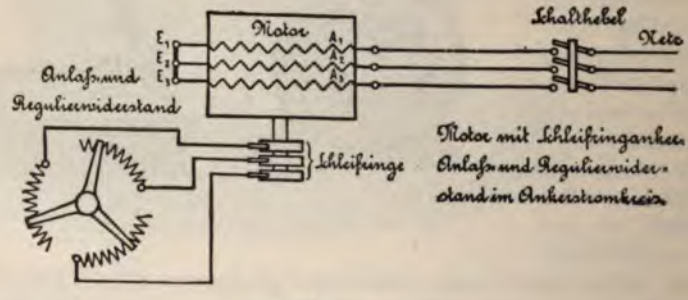
Beim Anlaufen, wenn der Motor noch stillsteht, wird eine sehr große Stromstärke verbraucht, teils deswegen, weil der Widerstand und die Selbstinduktion der festen Wicklung klein sind, teils deswegen, weil der Strom sofort in den Ankerwicklungen die starken Induktionsströme erzeugt. Um diese starke Stromentnahme beim Anlaufen zu vermindern und doch die Zugkraft des Motors nicht zu stören, kann man nicht, wie bei Gleichströmen, in den zugeführten Strom Widerstand einschalten, weil sonst die Zugkraft des Motors aufgehoben würde. Vielmehr schaltet man dann in die Ankerwicklung Widerstand und zwar induktionsfreien Widerstand (S. 247) ein. Um das aber tun zu können, muß man die Ankerwicklung doch wieder zu Schleifringen auf der Achse führen, an welchen man Bürsten schleifen läßt. Aus diesem Grunde werden größere Drehstrommotoren nicht mit Kurzschlußanker,

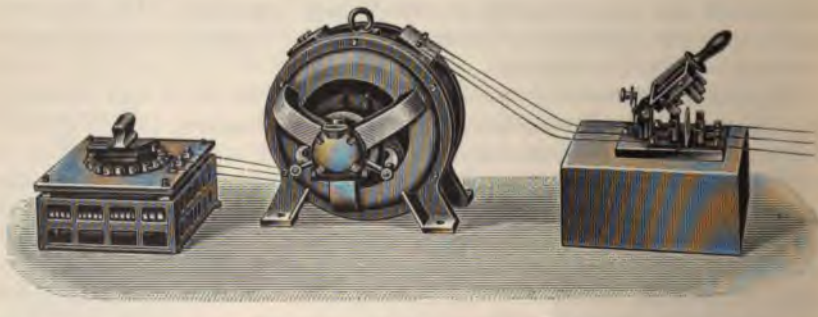
sondern mit einem Anker mit drei Schleifringen an der Achse und einem Anlaßwiderstand für den Anker ausgeführt. Fig. 472 zeigt einen solchen Anker mit Schleifringen. In Fig. 473 ist die Verbindung eines solchen Motors mit dem Netz dargestellt. Von dem Netz wird der Strom wie vorher durch einen dreiteiligen Schalthebel in die feste Wicklung des Motors eingeführt. Der Anker aber, dessen Drähte in drei Teile zusammengefaßt sind, trägt die drei Schleifringe und diese sind mit dem dreiteiligen Rheostaten links verbunden, auf welchem ein dreiteiliger Hebel, wenn er sich im Sinne des Uhrzeigers bewegt, allmählich den großen, zunächst eingeschalteten Widerstand ausschaltet, bis zuletzt der Anker kurz geschlossen ist.

Fig. 472.

Das Anlassen von Drehstrommotoren kann man aber noch auf andere Weise erreichen, die von den Siemens-Schuckertwerken benutzt wird.

Fig. 473.





Man kann nämlich die einzelnen Drähte des Ankers, die ja induziert werden, gegeneinander schalten, so daß der gesamte Strom in dem Anker gering ist, wodurch dasselbe erreicht wird, wie durch Einführung von Widerstand in den Anker. Ein solcher Motor läuft mit Kraft an. Sobald er eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat, werden selbsttätig die Ankerwindungen wieder normal geschaltet. Fig. 474 zeigt einen solchen Drehstrommotor mit Gegenschaltung, Fig. 475 den Anker

allein, bei welchem die normale Schaltung selbsttätig bei erlangter großer Geschwindigkeit vor sich geht.

Selbstverständlich kann man ebenso wie mit drei Dreiphasenströmen, so auch mit zwei Zweiphasenströmen Induktionsmotoren betreiben.

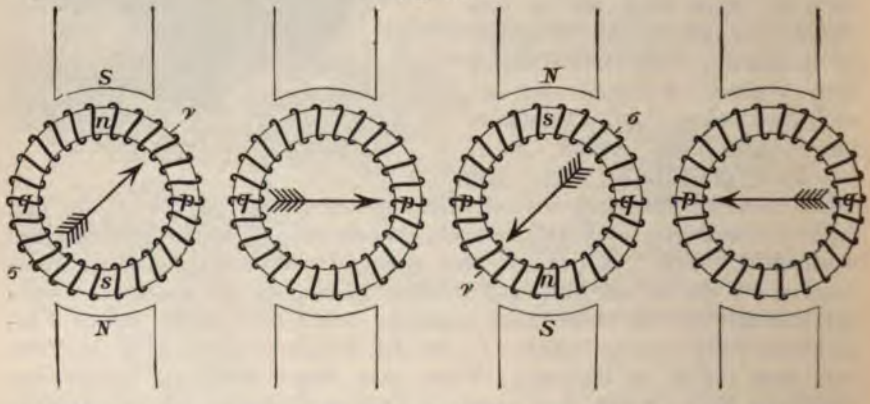
Die Erfindung und praktische Durchbildung der Drehstrommotoren gab nun aber auch das Mittel an die Hand, wie man auch für gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom brauchbare Motoren konstruieren könne. Erst Anfang 1893 traten zu gleicher Zeit die Maschinenfabrik Oerlikon und C. L. Brown mit diesen Konstruktionen an die Öffentlichkeit. Diese Einphasenmotoren wirken zuerst überraschend, sind aber bei näherer Betrachtung leicht erklärlich. Auch bei ihnen wird, wie bei den Drehstrommotoren, der Wechselstrom nur um einen feststehenden Ring geleitet, während der bewegliche Anker bloß Drahtwindungen oder Stäbe enthält, die in sich kurz geschlossen sind. Insofern unterscheiden sich also die Einphasenmotoren gar nicht von den Drehstrommotoren, bloß daß sie eben, wie es scheint, kein sich drehendes Magnetfeld haben. Da das nun aber gerade der Witz bei den Drehstrommotoren ist, da sie nur deswegen rotieren, weil eben bei ihnen ein Drehfeld erzeugt ist, so sieht man zunächst nicht ein, wieso solche Einphasenmotoren rotieren sollen. In der Tat kommen auch solche Motoren nicht von selbst in Drehung. Wenn man ihnen aber auf irgend eine künstliche Weise zuerst eine passende Drehung gegeben hat, so rotieren sie von selbst weiter und können dabei Arbeit leisten. Wie man ihnen zunächst die Anfangsdrehung erteilt, werden wir bald besprechen. Zunächst aber interessiert uns die Frage, ob und aus welchem Grunde ein solcher Kurzschlußanker in einem einfachen Wechselfeld weiter rotiert, wenn er einmal zu rotieren begonnen hat. Der Grund dafür ist derselbe, wie für die Tatsache, daß in einem Grammeschen Ring die Indifferenzstellen, wo die Bürsten aufliegen, in der Drehrichtung verschoben sind (S. 357). Wenn ein Grammescher Eisenring mit Drahtumwicklung sich zwischen zwei Polen S und N befindet, wie in Fig. 476, und in der Richtung nach rechts gedreht wird, so wissen wir, daß durch die entstehenden Ströme nach der Ampereschen Regel in dem Eisenring magnetische Pole entstehen würden bei p und q, während durch die direkte Wirkung der induzierenden Magnete die Pole n und s entstehen. Das Resultat dieser beiden Wirkungen ist, daß sich die Pole bei ν und σ bilden, daß also die magnetische Achse die Richtung des Pfeiles $\sigma\nu$ hat. Wenn nun die beiden Feldmagnetpole N und S nicht von einem Gleichstrom

Fig. 474.

Fig. 475.

gespeist werden, sondern von einem Wechselstrom, so wird der Südmagnetismus des oberen Pols von seinem größten Wert an allmählich abnehmen, er wird Null werden und wird dann in Nordmagnetismus übergehen, und umgekehrt wird es im unteren Pole sein. Entsprechend wird der Magnetismus des Ringes, der durch die Pole n und s gekennzeichnet ist, abnehmen, durch Null hindurchgehen und sich umkehren, aber immer in der Richtung n s oder s n wirken. Dagegen der durch die Ankerwindungen erregte Magnetismus wird immer die Richtung p q behalten und den größten Wert bekommen, wenn S und N sich gerade umkehren. In diesem Falle ist ja die Induktion immer am stärksten. Wir erhalten daher durch die Zusammensetzung dieser beiden Kräfte in dem Ring Pole, welche im Ring wandern. In der ersten Figur sind sie durch σ ν dargestellt, in der zweiten durch p q, wobei sich die Achse des Magneten gedreht hat. In der dritten und vierten Figur geht die Drehung weiter, und so ergibt

Fig. 476.



sich ein im Eisenring umlaufender Pol, ein magnetisches Drehfeld, ganz so wie bei den Mehrphasenströmen. Daher bleibt der Anker, wenn er einmal gedreht ist, in fortlaufender Rotation, und selbst wenn er Arbeit leistet, sucht er sich fortwährend dem synchronen Gange zu nähern, ohne ihn ganz zu erreichen.

Es kommt also nur darauf an, einem solchen Einphasenmotor zu Anfang eine Rotation zu erteilen, ihn a n g e h e n zu lassen, dann bleibt er von selbst in Rotation. Das Angehen aber kann man, wie schon T e s l a gezeigt hat, auf verschiedenfache Weise bewirken, am einfachsten so, daß man den Motor zuerst als Mehrphasenmotor benutzt. Zu dem Zweck versieht man den feststehenden Teil des Motors außer mit der Hauptwicklung noch mit einer Hilfswicklung. An diese Hilfswicklung wird außen eine Induktionsspule von großem Selbstpotential angeschaltet, so daß beim Einschalten des Motors in die Leitung diese beiden Wicklungen Wechselströme führen, die verschiedene Phasen besitzen. Denn das große Selbstpotential bringt ja eine Phasenverschiebung hervor. Dadurch kommt nun der Anker, wie bei jedem Zweiphasenmotor, in Rotation. Hat er eine genügende Rotation erreicht, so schaltet man die Hilfsspule durch einen einfachen Ausschalter aus und hat dann den Einphasenmotor.

Ein Schema für diese Anordnung ist in Fig. 477 gegeben. Von den beiden Hauptleitungen für den Wechselstrom, die oben in der Figur gezeichnet sind, zweigen zwei Drähte zu dem Motor ab, die durch die Sicherungen und den Ausschalter zu den Enden L_1 und L_2 der Hauptwicklung des Motors führen. Parallel zu dem Strom in dieser Hauptwicklung zweigt sich der Strom ab, der durch einen Ausschalter und die Induktionsspule in die Enden der Hilfswicklung H_1 und H_2 geht. Sobald der Motor läuft, öffnet man den Ausschalter in dem Hilfskreis, und der Motor läuft nun von selbst weiter.

Seit der Erfindung des asynchronen Wechselstrommotors sind nun auch diejenigen Anlagen, bei denen reiner Wechselstrom verwendet wird, imstande, sowohl Licht wie auch Arbeit durch Elektrizität zu erzeugen,

Fig. 477.

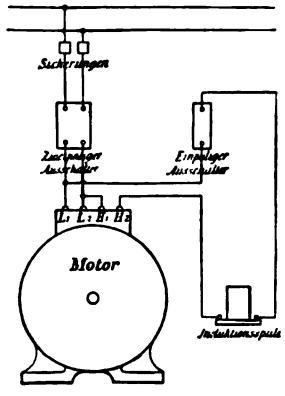
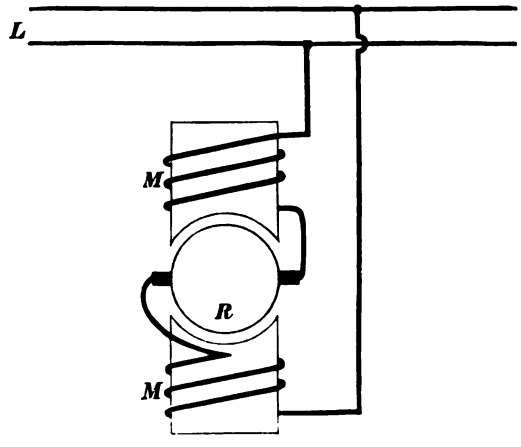


Fig. 478.



wenn auch der Einphaseninduktionsmotor nur ein Notbehelf ist. In Wirklichkeit nämlich geht ein solcher Einphasenmotor doch nur dann an, wenn er fast unbelastet ist. Durch die künstlichen Mittel kann man wohl eine Phasenverschiebung bei ihm hervorbringen, aber doch keine so große, daß der Motor etwa wie ein Drehstrommotor bei jeder Belastung angehen kann.

Da nun aber der reine Wechselstrom doch jedenfalls einfacher ist als der Drehstrom, schon weil er bloß zwei Leitungen gegen drei braucht, und weil namentlich für elektrische Vollbahnen (worunter man im Gegensatz zu den Straßenbahnen die großen, bisher mit Lokomotiven befahrenen Bahnen versteht) einphasiger Wechselstrom, wenn man einen guten Motor hätte, dem Drehstrom unbedingt vorzuziehen wäre, so hat die Technik immer wieder das Problem des Einphasenmotors aufgenommen und in der letzten Zeit auch ziemliche Erfolge erzielt.

Der oben erwähnte Einphasenmotor ist ein Induktionsmotor wie der Drehstrommotor. Man kann aber eigentlich, wenigstens im Prinzip, jede gewöhnliche Gleichstrommaschine, wenn sie Hauptschaltung besitzt (Anker, Magnete und äußerer Stromkreis hintereinander geschaltet), als einen Wechselstrommotor benutzen. In Fig. 478 ist das Schema einer

solchen Maschine mit den beiden Magnetschenkeln M und dem Ring R mit den Bürsten gezeichnet. Die Maschine erhält den Strom aus den beiden Leitungen L. Wenn Wechselströme in die Maschine hineinkommen, so geschieht folgendes. Beim Wechsel der Stromrichtung wird sowohl der Strom in den Magnetschenkeln, wie im Anker umgekehrt und daher bleibt die Drehrichtung des Ankers dieselbe. Also eine gewöhnliche Gleichstrommaschine muß, auch mit Wechselstrom betrieben, als Motor laufen. Nur wird man natürlich das Eisen der Magnete dabei unterteilen, lamellieren und wird Anordnungen anbringen müssen, um die Funken am Kommutator, die durch die Extraströme entstehen, und die hier besonders stark auftreten, zu beseitigen. An der Verringerung oder Beseitigung des

Fig 479

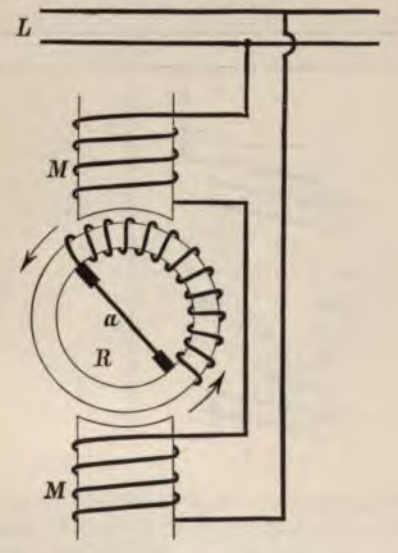
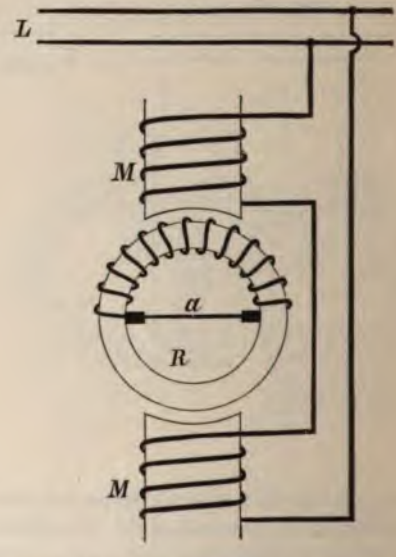


Fig. 480

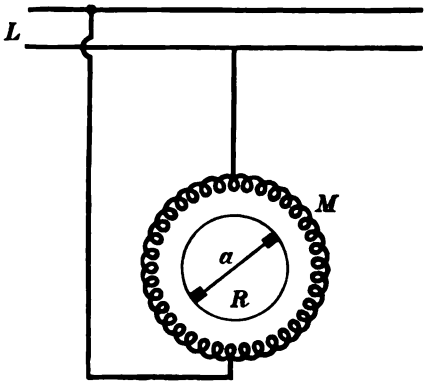


F e u e r n s dieser Motoren hängt die ganze Möglichkeit ihrer Verwendung. Es werden in neuerer Zeit tatsächlich Einphasenmotoren nach diesem Prinzip gebaut, man nennt sie e i n p h a s i g e S e r i e n m o t o r e n.

Man kann aber eine Gleichstrommaschine noch in zweiter Art als Einphasenmotor verwenden. Wenn man nämlich die Bürsten des Ankers um 45^0 gegen ihre richtige Stellung verschiebt und sie dann direkt durch einen kurzen Draht verbindet, also k u r z s c h l i e ß t, so hat man ebenfalls einen Einphasenmotor, der von selbst und zwar mit Kraft angeht. In Fig. 479 ist das Schema für diese Anordnung gezeichnet. Die Magnete M M erhalten Wechselstrom aus der Leitung L und die Bürsten des Ankers sind um 45^0 gegen ihre richtige Stellung gedreht und durch einen Draht a kurz geschlossen. Durch die Wechselströme in den Magneten werden die Drähte des Ringes induziert und zwar haben die Ströme in den unter den Magnetpolen liegenden Drähten solche Richtung, daß die ganze Ringhälfte sich symmetrisch unter den betreffenden Pol zu stellen sucht. Wenn daher die Bürsten, wie in Fig. 480 normal, senkrecht zu den Polen stehen,

so werden von jedem Pol alle unter ihm liegenden Stäbe gleich induziert und der Anker bleibt in Ruhe. Wenn dagegen die Bürsten schief stehen, wie in Fig. 479, so werden die Teile des Rings, die unter dem Pole stehen, induziert und der Anker dreht sich so, daß diese Windungen möglichst senkrecht unter die Polschuhe zu stehen kommen. Dadurch ist der Antrieb eines solchen Motors gegeben. Da die Bürsten immer an derselben Stelle bleiben, so dreht sich der Anker dauernd fort. Wechselstrommotoren dieser Art bezeichnet man als Repulsionsmotoren. Statt zwei ausgeprägte Magnetpole als Feldmagnete zu nehmen, kann man auch das Feld durch einen Eisenmantel erzeugen, wie in Fig. 481, auf dem die Windungen rings herum gleichmäßig verteilt sind und durch die beiden Zuleitungen von der Leitung her Wechselstrom erhalten. Die beiden Windungshälften des äußeren Ringes erzeugen dann immer noch ein Magnetfeld, dessen Achse in der Figur die vertikale Richtung hat, während die Bürsten im Ring R schief dagegen stehen.

Fig. 481.



Diese beiden Arten von Einphasenmotoren, die man auch als Kollektormotoren bezeichnet, werden jetzt von den verschiedenen großen elektrotechnischen Fabriken durchgearbeitet und man hofft, durch sie den lange gesuchten Motor zu gewinnen, der den einfachen Wechselstrom ebenso auszunützen gestatten würde, wie der Drehstrom bisher ausgenützt wurde.

Bisher hat sich aber von allen Motoren der Drehstrommotor bei weitem als der brauchbarste für die meisten Zwecke erwiesen. Er ist nicht bloß vorteilhafter als der Einphasenmotor, sondern er ist auch in vieler Beziehung dem Gleichstrommotor überlegen, überlegen an Kleinheit, Billigkeit, bequemer Gebrauchsfähigkeit ohne Wartung, größerer Anschmiegsamkeit an die Bedürfnisse der Praxis. Der Drehstrommotor läßt sich geradezu als ein idealer Motor bezeichnen.

Die Anwendbarkeit aller elektrischen Motoren, sowohl der Gleichstrommotoren, wie auch der für Drehstrom und Wechselstrom, ist nun natürlich eine sehr ausgedehnte. Sie sind überall da zu benutzen, wo eine Elektrizitätsquelle mit konstanter Spannung zur Verfügung steht, also insbesondere da, wo die Elektrizität aus Zentralstationen in die Häuser und Werkstätten geleitet wird.

Die Elektromotoren, namentlich die kleineren, haben im allgemeinen ziemlich große Umdrehungsgeschwindigkeiten. Um nun den Elektromotor mit den Arbeitsmaschinen zu verbinden, hat man vielfache bekannte Mittel. Brauchen die Arbeitsmaschinen selbst große Geschwindigkeiten, so ist es am einfachsten, den Motor direkt auf die Achse der Arbeitsmaschine zu setzen und diese dadurch zu treiben. So werden elektrische Ventilatoren bequem so konstruiert, daß die Ventilatorflügel direkt auf die Achse

des Motors aufgesetzt werden. Fig. 482 zeigt einen Konsolventilator mit Drehstrommotor der Siemens-Schuckertwerke. Mit 60 Watt, d. i.

Fig. 482.

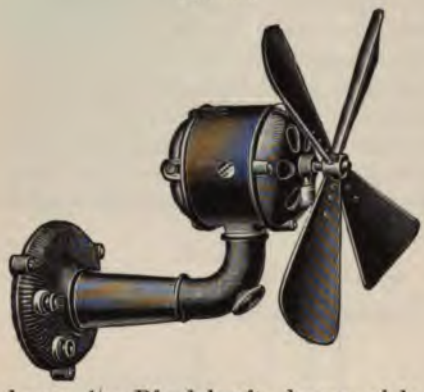


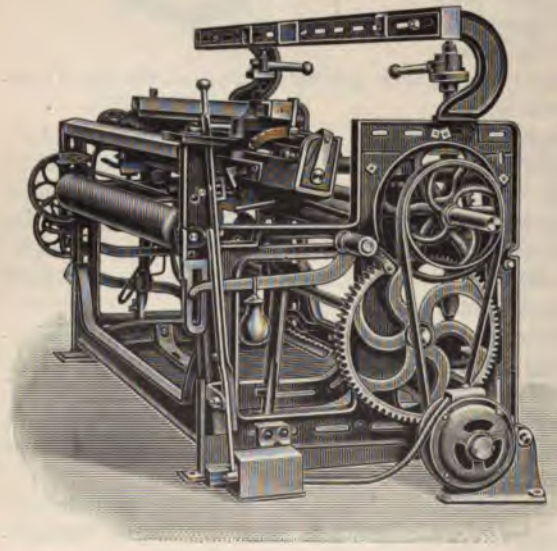
Fig. 483.

kaum $^1/_{10}$ Pferdekraft, lassen sich schon Ventilatoren betreiben, die pro Stunde bis 1800 cbm Luft befördern.

Ebenso wird bei Zentrifugen der Elektromotor am bequemsten direkt auf die Achse derselben gesetzt.

In manchen Fällen wird die Bewegung von dem Motor auf die Arbeitsmaschine durch ein Rädervorgelege bewirkt. Eine bequeme Einrichtung dazu, bei der das Rädervorgelege gleich fest mit dem Motor verbunden ist, zeigt Fig. 483. Links in der Figur sind die Zahnräder, die in einem mit Öl gefüllten Kasten laufen und von denen das langsamer laufende mit der Arbeitsmaschine verbunden wird. Die rasch rotierenden Elektromotoren müssen häufig durch solche Vorgelege langsamer rotierende Maschinen antreiben.

Fig. 484.



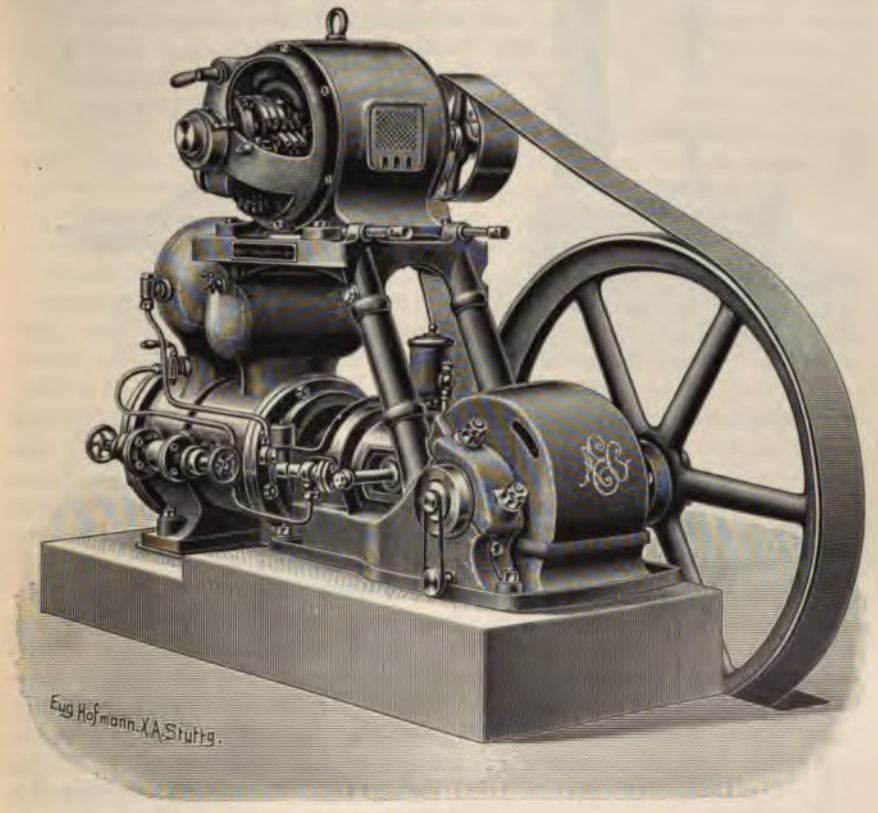
In den meisten Fällen aber geschieht die Verbindung des Elektromotors mit der Arbeitsmaschine durch Riemen oder Schnüre. So zeigt Fig. 484 die Anbringung eines Drehstrommotors an einem Webstuhl. Vorn rechts am Boden ist der kleine Drehstrommotor.

Bei elektrisch betriebenen P u m p e n sind die Elektromotoren

infolge ihrer großen Tourenzahl zunächst nur bei Zentrifugalpumpen direkt anzubringen gewesen, aber die neuen, rasch laufenden Kolbenpumpen erlauben ebenfalls direkten Antrieb durch Elektromotoren. Fig. 485 zeigt eine Motorpumpe der A.E.G., bei welcher der oben sitzende Motor durch Riemen die Pumpe antreibt.

Bei den Bohrmaschinen und Poliermaschinen wird der Bohr- oder Polierapparat häufig mit dem Motor direkt verbunden.

Fig. 485.



So zeigt Fig. 486 eine Tischbohrmaschine der Siemens-Schuckertwerke, Fig. 487 zeigt eine Handbohrmaschine, die so eingerichtet ist, daß an dem Brustschild die Leitungsschnur aufgewickelt werden kann, während unter dem einen Handgriff ein Druckschalter zum Ein- und Ausschalten des Motors angebracht ist.

Man kann mit der Achse des Motors auch eine biegsame Welle verbinden, wie in Fig. 488, und mittels dieser den Antrieb für kleine Bohrer, Fräser oder andere Werkzeuge schaffen. Bei den Zahnärzten sind derartige kleine Bohrer vielfach im Gebrauch.

Sehr vorteilhaft sind die Elektromotoren in großen Fabriken, bei denen sie die großen, umständlichen und viel Arbeit konsumierenden

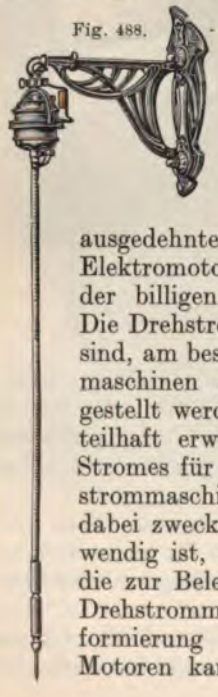
Haupttransmissionen beseitigen. Statt von der Dampfmaschine die Bewegung durch Riemen auf große Wellen mit gemeinschaftlichem Antrieb zu übertragen und von diesen wieder auf zweite, ja sogar auf dritte Wellen, bringt man vorteilhaft an jeder Arbeitsmaschine oder an einer nahestehenden Gruppe von Arbeitsmaschinen einen Elektromotor an, zu dem die Kraft durch bequem zu führende Drähte geleitet wird, statt durch die unbequemen und kraftverzehrenden Riementransmissionen.

Fig. 486.

Eine wesentliche Bedeutung hat die elektrische Arbeitsleistung in Bergwerken wegen ihrer großen Gefahrlosigkeit und wegen der Leichtigkeit, mit der die Leitung zu den Motoren geführt werden kann, gewonnen. Die Elektromotoren werden dort zum Betrieb von Pumpen, Ventilatoren und Bohrmaschinen und zum Betrieb der Fördermaschinen gebraucht.

Fig. 487.

Fig. 488.



In der Landwirtschaft werden die Elektromotoren zum Antrieb von Dreschmaschinen, Buttermaschinen, Häckselschneidemaschinen, Pumpen u. s. w. benutzt. In der Landwirtschaft mit ihren ausgedehnten Flächen, auf denen elektrische Beleuchtung und Elektromotoren gebraucht werden können, kommt meistens, wegen der billigen Fortleitung, hochgespannter Drehstrom in Frage. Die Drehstromdynamo wird dabei, wenn Wasserkräfte vorhanden sind, am besten von einer solchen getrieben, sonst müssen Dampfmaschinen oder auch Lokomobilen zum Betrieb derselben aufgestellt werden. Dabei hat es sich in vielen Fällen als sehr vorteilhaft erwiesen, eine gemeinsame Anlage zur Erzeugung des Stromes für mehrere benachbarte Güter einzurichten. Die Gleichstrommaschine zur Erregung der Drehstrommaschine wählt man dabei zweckmäßig gleich größer, als für die bloße Erregung notwendig ist, damit man von ihr auch Akkumulatoren laden kann, die zur Beleuchtung der Wohnhäuser während der Nacht, wo die Drehstrommaschine nicht arbeitet, dienen können. Die Transformierung des hochgespannten Drehstroms für die einzelnen Motoren kann man dann durch fahrbare Transformatoren vor-

nehmen und so die Motoren z. B. auch zum Pflügen, zum Mähen auf freiem Felde brauchen.

Auf Kriegs- und Handelsschiffen wird eine Reihe mechanischer Arbeiten leicht und zweckmäßig von Elektromotoren geleistet.

Ein sehr ausgedehntes Feld hat sich die elektrische Arbeitsleistung bei den Aufzügen für Personen und Lasten erworben. Es stellt sich nämlich der Betrieb eines elektrischen Aufzuges, wenn eine Stromzufuhr in dem Hause vorhanden ist, ungefähr 5- bis 10mal so billig wie der Betrieb mittels Gasmaschinen oder mittels Wasserleitungswasser, und zwar aus dem Grund, weil der Elektromotor eben nur zu laufen braucht, wenn der Aufzug in Betrieb gesetzt ist, und weil sich sein Energieverbrauch durchaus nach der gerade beförderten Last richtet. Die elektrischen Aufzüge werden jetzt derart konstruiert, daß der Elektromotor im Keller oder auf dem Boden neben dem Schacht für den Aufzug steht. Der Aufzug selbst hängt an Seilen, und durch den Elektromotor werden diese Seile auf eine Trommel aufgewickelt oder von ihr abgewickelt, wobei der Aufzug sich hebt oder senkt. Es müssen natürlich dabei Vorrichtungen angebracht sein, daß man von dem Fahrstuhl selbst aus den Motor in Betrieb setzen kann und zwar ihn nach der einen oder anderen Richtung in Bewegung bringen kann. Diese Steuervorrichtungen für Aufzüge sind jetzt für elektrischen Betrieb so ausgebildet, daß durch bloßen Druck auf einen Knopf, sei es von außen oder vom Fahrstuhl selbst, der Aufzug sich in Bewegung setzt und von selbst stoßfrei in der gewünschten Etage stehen bleibt. Dadurch kann in vielen Fällen das Bedienungspersonal für einen Aufzug erspart werden.

Die Laufkranen in Fabriken und die Schiffskranen werden jetzt fast allgemein durch Elektromotoren angetrieben.

Die Vorzüge der Elektromotoren bestehen in der sofortigen Betriebsbereitschaft, in der Gefahrlosigkeit, in dem kleinen Raum, welchen sie einnehmen, und der Billigkeit der Anlage, verglichen mit den Anlagekosten für kleine Gasmaschinen oder Dampfmaschinen und endlich darin, daß sich ihr Verbrauch direkt nach der Leistung richtet. Denn da die Klemmenspannung konstant bleibt, so ist der Effekt allein abhängig von der Stromstärke, die nach der Leistung größer oder kleiner wird. Die verbrauchte Stromstärke, die mit einem Elektrizitätszähler (s. Kap. 9) gemessen und nach irgend einem Satz berechnet wird, bedingt die Kosten des Betriebes.

Die große Bedeutung der elektrischen Arbeitsleistung besteht darin, daß es durch sie möglich wird, kleine Motoren, kleine Kräfte unter $^1/_2$ Pferdekraft, bequem aufzustellen und zu betreiben. Diese Maschinenbetriebskraft in kleinem Umfange ist es gerade, welche dem Kleingewerbe früher fehlte. Aus Mangel an Maschinenbetrieb kam es in Nachteile gegenüber dem Großgewerbe. Durch Einführung von elektrischen Strömen, die in Zentralstationen erzeugt und überallhin geleitet werden, werden nun aber dem Kleingewerbe Motoren schon von $^1/_{16}$ Pferdekraft geliefert, welche ihre Arbeit zu billigem Preise leisten und deren Verbrauch an Elektrizität in demselben Verhältnis steht wie die geleistete Arbeit.

Die elektrische Kraftverteilung ist also nationalökonomisch und sozialpolitisch von hervorragender Wichtigkeit. Die Elektrizität

selbst wird dabei in großen Zentralstationen, sei es durch Maschinenkraft, sei es durch Wasserkraft erzeugt, und durch ihre Vermittelung wird die Kraft auf viele Stellen verteilt. Technisch ist es dabei notwendig, diese Verteilung so zu bewerkstelligen, daß ein Motor den anderen nicht stört, daß z. B. der eine Motor außer Tätigkeit gesetzt werden kann, ohne daß die anderen Motoren in ihrem Gange beeinflußt würden und dadurch unzweckmäßig arbeiten. Diese Aufgabe ist ganz analog derjenigen, welche beim Betrieb von Glühlampen in einem ganzen Stadtteil sich ergab. Auch dort kam es darauf an, jede Glühlampe unabhängig von den anderen zu machen, es durften 100, 1000 Lampen zu gleicher Zeit ausgelöscht werden, ohne daß die anderen dadurch gestört wurden. Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die Glühlampen alle nebeneinander geschaltet werden und daß die Dynamomaschinen, welche den ganzen Strom erzeugen, so reguliert werden, daß in den Leitungen, zwischen welchen die Glühlampen eingeschaltet sind, stets dieselbe Spannung herrscht. Genau so ist die Lösung, die für die elektrische Arbeitsleistung allgemein gebraucht wird.

Auch bei der Arbeitsverteilung werden alle Elektromotoren, die also an den verschiedenen Stellen Arbeit zu leisten haben, nebeneinander (parallel) in den Stromkreis eingeschaltet, der von der Zentralstation kommt.

Die Größe der Arbeit, welche jeder Elektromotor (bei Gleichstrom) pro Sekunde leisten kann, ist gleich dem Produkt aus seiner Klemmenspannung und der Stromstärke, welche in ihm herrscht. Die Stromstärke in jedem parallel geschalteten Elektromotor hängt, wenn seine Klemmenspannung dieselbe bleibt, nur ab von der Arbeit, die der Motor leistet. Wenn man also bewirken kann, daß die Klemmenspannung an den Enden jedes Elektromotors dieselbe bleibt, welches auch die Vorgänge sonst in dem Stromkreis sind, so wird jeder Motor ganz unabhängig von den Vorgängen in den anderen Maschinen sein. Dies ist also das Einzige, was verlangt wird: Es muß an den Enden jedes Elektromotors stets dieselbe Klemmenspannung herrschen. Und dies wird erreicht, indem man die Elektromotoren alle parallel zwischen Leitungen von konstant gehaltenem Spannungsunterschied einschaltet.

Der Gebrauch der Elektromotoren hat sich in den letzten Jahren rapid ausgedehnt. In allen Städten, in welchen durch elektrische Zentralstationen eine bequeme Zuleitung des elektrischen Stromes vorhanden ist, wird für den Betrieb von Elektromotoren jetzt schon ebensoviel und mehr an Strom verbraucht, als für die Erzeugung von Licht, und überall zeigt sich der leichte, gefahrlose, bequeme und auch billige Betrieb der Elektromotoren von größtem Vorteil. In diesem Sinne trägt also die Elektrizität das Ihrige mit dazu bei, um die jetzt im Vordergrund des Interesses stehende soziale Frage der Lösung dadurch näher zu bringen, daß sie den Kleinen dieselben Vorteile in der Arbeitsleistung zuwendet, welche die Großen schon lange haben.

8. Kapitel.

Die elektrische Kraftübertragung.

Die große Leichtigkeit, mit der elektrische Ströme auf Drähten über weite Strecken hinweggeführt werden können und die man anfangs nur in der Telegraphie verwertete, um Signale und Zeichen in die Ferne zu schicken, diese Eigenschaft der Elektrizität wird seit der Erfindung der Dynamomaschine, seitdem sich die sogenannte Starkstromtechnik entwickelt, zu einer der größten und folgenreichsten Aufgaben benutzt, nämlich dazu, Kräfte, sei es die von der Natur direkt gebotenen oder die von uns künstlich hergestellten, ihre Wirksamkeit an weit entfernten Stellen ausüben zu lassen, zu der Übertragung der Kraft.

Im Grunde genommen haben wir es bei allen Leistungen der Elektrizität mit einer Übertragung der Kraft zu tun. Wenn wir z. B. im Keller eines Hauses eine Gasmaschine aufstellen, durch diese eine Dynamomaschine treiben und mit deren Strömen in den einzelnen Stockwerken Glühlampen speisen oder Bogenlampen brennen lassen oder Elektromotoren treiben, so haben wir schon die Kraft der Gasmaschine oder, besser gesagt, die Arbeit, die die Gasmaschine leistet, in die verschiedenen Stockwerke übertragen und sie teils zur Beleuchtung, teils wieder zur Leistung von Arbeit (durch die Elektromotoren) verwendet. Man spricht aber in diesem Fall nicht von Kraftübertragung, weil die Entfernung zwischen der Stelle, wo die Kraft vorhanden ist, und denjenigen Stellen, wo sie nützliche Arbeit leistet, eine geringe ist, die man eventuell auch durch andere Transmissionsmittel überwinden könnte, sondern man spricht von eigentlicher Kraftübertragung erst dann, wenn die Entfernungen so groß sind, daß man außer durch Elektrizität nur durch komplizierte Mittel, wie Druckluft oder Drahtseile, die Kraft überhaupt verwenden könnte. Prinzipiell ist aber natürlich ein Unterschied zwischen der Kraftübertragung auf geringe und auf große Entfernungen nicht vorhanden.

Bei der elektrischen Kraftübertragung werden also zuerst durch Aufwendung von Arbeit, z. B. von einer Dampfmaschine oder einer Wasserkraft, elektrische Ströme in einer Dynamomaschine erzeugt; diese werden durch Drahtleitungen beliebig weit fortgeführt und in eine zweite Dynamomaschine, den Elektromotor, eingeführt und dessen Anker wird dann durch sie in Drehung versetzt. Durch diese Drehung kann man dann die zweite Maschine Arbeit leisten lassen, indem man ihre Bewegung in gewöhnlicher Weise durch Riemen oder Zahnräder auf irgend eine Arbeitsmaschine überträgt, wie wir das im vorigen Kapitel besprochen haben. Da die beiden Dynamomaschinen, die stromgebende und die arbeitleistende, beliebig weit auseinander stehen können, so kann man also die Ströme da erzeugen, wo die Betriebskraft billig ist, und kann

auf elektrischem Wege Arbeit dort leisten, wo die Betriebskraft teuer ist. Ferner kann man die elektrischen Ströme ja beliebig verzweigen, man kann also auch von einer Kraftmaschine aus mittels Elektrizität die Kraft auf beliebig viele Punkte verteilen, was bei direkter Benutzung der Kraftmaschine nur in speziellen Fällen möglich ist.

Im letzteren Falle hat man also eine Übertragung und Verteilung von Arbeit.

Die elektrische Arbeitsübertragung, wie sie eben skizziert wurde, erfordert mithin notwendig eine Reihe von Maschinen. Erstens nämlich die Kraftmaschine, den Motor. Hauptsächlich wird als solcher eine Turbine genommen werden, da es sich meistenteils um die Verwertung von Wasserkräften handelt, es kann aber auch eine Dampfmaschine oder eine Gasmaschine oder ein durch Wind getriebenes Rad die ursprüngliche Kraftmaschine sein. Von dieser Kraftmaschine wird die Bewegung auf eine Dynamomaschine übertragen, in welcher die mechanische Arbeit in elektrische Ströme umgewandelt wird. Diese Dynamomaschine nennt man die primäre Maschine. Von ihr aus werden dann die elektrischen Ströme durch Drähte fortgeleitet bis zu einer zweiten Dynamomaschine, der sekundären Maschine, deren Anker durch diese elektrischen Ströme in Drehung kommt und Arbeit leisten kann. Man braucht also in dieser Anordnung einen Motor, eine primäre und eine sekundäre Dynamomaschine und eine Drahtleitung zu jeder elektrischen Kraftübertragung.

Die hauptsächlichste Anwendbarkeit dieser direkten elektrischen Kraftübertragung besteht, wie gesagt, darin, daß eine Kraftquelle dadurch an einer Stelle Arbeit leisten kann, von der sie weit entfernt ist. Es dient also diese elektrische Übertragung der Arbeit hauptsächlich dazu, um Wasserkräfte an entfernten Stellen Arbeit verrichten zu lassen. Die Energie, welche von Wasserfällen und überhaupt von fließendem Wasser zum Treiben von Maschinen benutzt werden kann, wird ja von der Natur in unerschöpflicher Fülle direkt geboten, und die Benutzung derselben erfordert oft keine viel größeren Kosten als die der ersten Einrichtung. Wenn also auch bei der elektrischen Kraftübertragung auf einigermaßen weite Entfernungen 25 Proz. der Arbeit verloren gehen sollten, so kann es doch in vielen Fällen von großem Vorteil sein, diese direkt dargebotenen natürlichen Kräfte zur Arbeitsleistung zu verwenden, die man sonst ganz unbenutzt lassen muß. In der Tat macht die Ausnutzung der Wasserkräfte auf elektrischem Wege seit einigen Jahren sehr bedeutende Fortschritte. Die Schweiz ist darin mit gutem Beispiel vorangegangen, aber auch in Deutschland haben die Industriellen allmählich die große Bedeutung dieser Kraftübertragung einsehen gelernt.

Ein anderes Gebiet der Anwendung der elektrischen Kraftübertragung, das aber erst anfängt, angebaut zu werden, ist folgendes. Alle unsere Arbeitsmaschinen werden ja hauptsächlich vermittels Dampfmaschinen durch Verbrennung von Kohlen getrieben, und es müssen die Kohlen aus den Bergwerken an die betreffenden Stellen geschafft werden, wo sie verwendet werden sollen. Falls die Kosten dieses Transportes größer sind als der Verlust, den man an Energie (und an Zinsen

der Einrichtungskosten) durch die elektrische Kraftübertragung erleidet, so empfiehlt es sich offenbar mehr, die Kohlen, anstatt sie zu transportieren, an den Bergwerken selbst in großen Dampfmaschinen zu verbrennen und die Kraft auf elektrischem Wege dorthin zu leiten, wo man sie braucht.

Ferner ist es in vielen Fällen auch vorteilhaft, auf elektrischem Wege Kraft zu übertragen, wenn es gilt, eine Reihe von weit auseinander liegenden kleinen Maschinen zu betreiben. Erfahrungsgemäß stellt sich der Verbrauch an Kohlen für kleine Dampfmaschinen von wenigen Pferdekräften relativ ziemlich doppelt und dreifach so hoch, als für große Dampfmaschinen schon von 50 bis 100 Pferdekräften. Wenn man also statt einer Reihe von kleinen Dampfmaschinen eine große aufstellt und ihre Arbeit auf elektrischem Wege an verschiedene Orte verteilt, so kann man an Unterhaltungs- und Einrichtungskosten sparen. Dies sind einige Fälle, in denen die elektrische Kraftübertragung mit Vorteil eintritt.

Es fragt sich jedoch zuerst, welches speziell die Vorgänge bei der elektrischen Kraftübertragung sind, und auf welche Ausbeute man dabei rechnen kann.

Wenn die primäre Maschine von einem Motor getrieben wird und in dem ganzen äußeren Stromkreis sich keine andere Maschine befindet, so hängt die Stromstärke im ganzen Kreise nur ab von der elektromotorischen Kraft der Maschine und dem gesamten Widerstande, sowohl dem inneren der Maschine, als dem äußeren des Stromkreises, und zwar nach dem Ohmschen Gesetz

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft der Maschine}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Bei bestimmter Tourenzahl und bestimmtem Widerstand hat die Maschine eine bestimmte elektromotorische Kraft und es herrscht daher eine bestimmte Stromstärke. Die elektromotorische Kraft der Maschine wird um so größer, je größer deren Geschwindigkeit ist, weil dann die Dauer der einzelnen Induktionen eine um so geringere ist.

Befindet sich nun eine zweite Dynamomaschine in dem Stromkreis und wird diese durch den Strom der ersten in Bewegung gesetzt, so entsteht in dem Anker derselben ja ebenfalls eine elektromotorische Kraft, welche der der ersten Maschine, wie wir wissen, entgegengesetzt ist. Es besteht also jetzt der Gesamtwiderstand des ganzen Systems aus dem inneren Widerstand der beiden Maschinen und aus dem Widerstand der Verbindungsdrähte. Und die gesamte elektromotorische Kraft, die im Stromkreise wirkt, ist die Differenz der elektromotorischen Kräfte beider Maschinen, so daß sich die Stromstärke jetzt nach dem Ohmschen Gesetz folgendermaßen darstellt:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Differenz der elektromotorischen Kräfte}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Wenn also der Gesamtwiderstand des Stromkreises jetzt der gleiche ist wie früher, so ist doch die Stromstärke jetzt eine geringere als in dem Fall, wo keine sekundäre Maschine vorhanden war, weil eben die elektro-

motorische Kraft der zweiten Maschine entgegenwirkt. Die elektromotorische Kraft jeder Maschine hängt außer von dem gesamten Widerstand und ihrer sonstigen Einrichtung nur ab von der Geschwindigkeit, mit welcher ihr Anker rotiert. Sind also die beiden Dynamomaschinen gleich gebaut, so hängt die Stromstärke nur ab von der Differenz der Geschwindigkeit beider Maschinen und dem Gesamtwiderstand. Daraus ergibt sich ein merkwürdiges Resultat. Wenn beide Maschinen ganz gleich gebaut sind und gleich schnell rotieren, so muß die Stromstärke im gesamten Stromkreis gleich Null sein. Die beiden Maschinen könnten aber bloß dann gleich schnell rotieren, wenn in beiden keine Reibungswiderstände zu überwinden wären. Dann hätte man also den Fall, daß von dem Motor die primäre Maschine getrieben wird, daß durch den Strom, der in ihr erzeugt wird, die sekundäre Maschine in Bewegung kommt, daß diese immer rascher rotiert, wodurch die Stromstärke im ganzen Stromkreis immer mehr abnimmt, und daß sie schließlich so rasch rotiert wie die erste, wobei dann durch die Leitung kein Strom fließt. In diesem Fall wird weder an der primären Maschine Arbeit geleistet, noch von der sekundären Maschine Arbeit abgegeben, in diesem Falle findet also gar keine Übertragung von Kraft statt. Dieser Fall ist natürlich nicht zu realisieren, obwohl er mit großer Annäherung praktisch erreicht werden kann.

Sobald man aber die zweite Maschine Arbeit leisten läßt, indem man sie z. B. eine Dreschmaschine treiben läßt, so nimmt ihre Geschwindigkeit, also auch ihre elektromotorische Gegenkraft ab, wodurch die Stromstärke im ganzen Kreise vergrößert wird.

Wir wollen annehmen, es sei eine elektrische Kraftübertragung im vollen Gange. Es seien also zwei Dynamomaschinen vorhanden, die durch eine beliebige Leitung verbunden seien, und es werde etwa durch eine Dampfmaschine der ersten fortwährend Energie zugeführt, während die zweite fortwährend nutzbare Arbeit leistet, z. B. Wasser aus einer Grube hebt. Wir wollen sehen, wie sich die aufgewendete und die nutzbare Arbeit zu einander verhalten. Beide Maschinen haben dabei gewisse Geschwindigkeiten und durch die ganze Leitung und die Maschinen fließt ein Strom von bestimmter Stärke.

Die gesamte Arbeit, die von der Dampfmaschine in jeder Sekunde auf die erste Maschine übertragen wird, wird nun zu folgenden Leistungen benutzt:

Erstens dient sie dazu, die Reibungswiderstände der primären Maschine zu überwinden.

Zweitens erzeugt sie durch die Drehung der primären Maschine in dieser Foucaultsche Ströme, welche sich in Wärme umsetzen und die für die Arbeitsleistung, ebenso wie die Reibung, nutzlos sind.

Drittens aber erzeugt sie in der primären Maschine eine elektromotorische Kraft, welche nun den Strom durch die ganze Leitung und in die sekundäre Maschine sendet.

Der gesamte Effekt dieses Stromes ist gleich dieser elektromotorischen Kraft multipliziert mit der Stromstärke, und zwar ist dieser Effekt in Watt ausgedrückt, wenn die elektromotorische Kraft in Volt, die Stromstärke in Ampere gemessen wird. Aber von diesem ganzen Effekt

wird ein Teil in der primären Maschine selbst verbraucht, nämlich in Joulesche Wärme verwandelt, und derjenige Effekt, der von der Maschine nach außen abgegeben wird, in die Leitung und in die sekundäre Maschine, ist nur gleich dem Produkt aus der Klemmenspannung der Maschine und der Stromstärke. Wozu nun dieser Effekt im äußeren Stromkreis verwendet wird, das ist Sache der Anordnung, der Leitung u. s. w. Er kann eventuell vollständig nutzbar verwendet werden. Deshalb kann man das Verhältnis, in welchem dieser äußere Effekt zur aufgewendeten Arbeit steht, welches wir oben S. 369 als das Güteverhältnis der Maschine bezeichnet haben, auch zweckmäßig den industriellen Wirkungsgrad der primären Maschine nennen. Dieser Wirkungsgrad beträgt bei guten Dynamomaschinen 85 bis 90 Proz. und mehr.

Der Effekt im gesamten äußeren Stromkreis wird nun zu folgenden zwei Leistungen verwendet. Erstens dient ein Teil zur Erwärmung der Leitung zwischen der primären und sekundären Maschine nach dem Jouleschen Gesetz. Diese Leistung wollen wir als Leitungsverlust bezeichnen. Sie hat offenbar wirtschaftlich nur die Bedeutung eines Verlustes und es ist unsere Aufgabe, sie möglichst zu verringern. Der übrige Teil des gesamten äußeren Effektes wird von der sekundären Maschine absorbiert.

Wesentlich für die Leistung der Kraftübertragung ist nur der letztere Teil. An den Klemmen der sekundären Maschine herrscht eine bestimmte Klemmenspannung. Diese mit der Stromstärke multipliziert, gibt den Effekt in Watt, welcher von der zweiten Maschine absorbiert wird.

Dieser von der zweiten Maschine aufgenommene Effekt wird nun einerseits nutzlos verwendet zur Überwindung von Reibungswiderständen, zur Erzeugung Foucaultscher Ströme und zur Erwärmung der Drähte in der zweiten Maschine nach dem Jouleschen Gesetz; andererseits aber wird er nutzbar verwendet, nämlich zur Leistung der nutzbaren Arbeit, welche eben gerade von der sekundären Maschine verlangt wird (in unserem Beispiel zum Heben von Wasser).

Ganz entsprechend, wie oben bei der primären Maschine, bezeichnen wir nun hier das Verhältnis, in welchem die nutzbare Arbeit der zweiten Maschine zu dem gesamten von ihr aufgenommenen Effekt steht, als den industriellen Wirkungsgrad der sekundären Maschine.

Endlich bezeichnen wir das Verhältnis der ganzen geleisteten Nutzarbeit der sekundären Maschine zur gesamten von der primären Maschine aufgenommenen Arbeit als den Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung. Es ergibt sich ohne weiteres, daß dieser letztere Nutzeffekt um so größer wird, je größer die Wirkungsgrade der beiden einzelnen Maschinen sind und je geringer der Leitungsverlust ist. Der Leitungsverlust ist aber um so geringer, je kleiner die Stromstärke ist, die in der Leitung fließt, also um so geringer, je mehr die Klemmenspannungen der beiden Maschinen einander nahe kommen.

Um nun diese Verhältnisse besser übersehen zu können, soll ein Beispiel aus einer ausgeführten Kraftübertragungsanlage angeführt wer-

den. In Kriegsstetten in der Schweiz befindet sich nämlich eine Wasserkraft, deren Arbeit auf elektrischem Wege nach Solothurn übertragen wird, welches 8 km von Kriegsstetten entfernt ist. In Kriegsstetten befinden sich zwei primäre Maschinen hintereinander, in Solothurn ebenfalls zwei sekundäre Maschinen. Die Leitung zwischen beiden Stationen besteht aus Kupferdraht von 6 mm Dicke. Es war nun bei einem Versuch die ganze Arbeit pro Sekunde, welche auf die primären Maschinen von der Wasserkraft übertragen wurde, 30,85 Pferdekräfte. Die Stromstärke ergab sich in der ganzen Leitung zu 11,474 Ampere und die Klemmenspannung an der primären Maschine betrug dabei 1753,3 Volt. Folglich war der Effekt im ganzen äußeren Stromkreis $1753{,}3 \times 11{,}474$ Watt, also 27,33 Pferdekräfte. Und daher ergab sich der industrielle Wirkungsgrad der primären Maschine zu $\frac{27{,}33}{30{,}85} = 0{,}886$. Das heißt 88,6 Proz. der Arbeit, welche auf die erste Maschine übertragen wird, gehen in den äußeren Stromkreis. Die übrigen 11,4 Proz. werden nutzlos in Wärme verwandelt.

An den Klemmen der zweiten Maschine ergab sich nun ferner eine Spannung von 1655,9 Volt. Mithin ist der ganze von der zweiten Maschine aufgenommene Effekt $1655{,}9 \times 11{,}420$ Watt, das ist 25,69 Pferdekräfte. (Die Stromstärke war in der zweiten Maschine etwas kleiner, weil in der Leitung die Isolation nicht vollkommen war.)

Daraus ergibt sich, daß in der Leitung $27{,}33 - 25{,}69 = 1{,}64$ Pferdekräfte verloren gingen, welche in Joulesche Wärme umgesetzt wurden. Die Nutzarbeit nun, welche die zweite Maschine pro Sekunde leistete, wurde ebenfalls direkt gemessen und ergab sich zu 23,21 PS. Von dem ganzen in sie eingeführten Effekt von 25,69 PS wurden also noch 2,48 Pferdekräfte zur Überwindung der Reibungswiderstände, zur Erzeugung Foucaultscher Ströme und zur Erzeugung der Jouleschen Wärme in der sekundären Maschine verwendet. Der industrielle Wirkungsgrad der zweiten Maschine ist daher $\frac{23{,}21}{25{,}69} = 0{,}903$. Die zweite Maschine verwandelt also 90,3 Proz. von der in sie eingeführten elektrischen Energie in mechanisch nutzbare Arbeit. Endlich ist der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung gleich dem Verhältnis der zurückgewonnenen nutzbaren Arbeit von 23,21 Pferdekräften zu der gesamten aufgewendeten Arbeit von 30,85 Pferdekräften, also gleich $\frac{23{,}21}{30{,}85} = 0{,}756$. Mithin werden 75,6 Proz. der gesamten aufgewendeten Arbeit in diesem Falle auf 8 km übertragen und dort wieder nutzbar gewonnen.

Eine sehr wesentliche Frage ist es nun, welchen Einfluß die Entfernung der beiden Maschinen auf den Nutzeffekt der Kraftübertragung hat. Je weiter die Maschinen voneinander stehen, desto länger müssen die Drähte sein, die beide Maschinen miteinander verbinden. Die Leitungsdrähte werden durch den Strom erwärmt und die Erwärmung ist direkt proportional ihrem Widerstand, wird also, unter sonst gleichen Umständen, um so größer, je länger die Verbindungsdrähte sind. Diese Erwärmung geschieht auf Kosten des Effektes im äußeren Stromkreis

der primären Maschine, sie bildet also direkt eine Verringerung der von der sekundären Maschine nutzbar zu leistenden Arbeit.

Unsere obige Betrachtung über den Nutzeffekt der Kraftübertragung läßt uns sofort diesen Einfluß erkennen. Der Nutzeffekt hängt erstens ab von der Güte der beiden Maschinen, von ihrem industriellen Wirkungsgrad. Dieser ist bei allen neueren Maschinen 85 bis 90 Proz. oder mehr, also ein recht hoher. Zweitens hängt dieser Nutzeffekt aber ab von dem Verhältnis der Klemmenspannung an der sekundären und primären Maschine. Je größer dieses Verhältnis ist (es kann höchstens gleich 1 werden), um so besser ist der Nutzeffekt. Es kommt also darauf an, dieses Verhältnis möglichst groß zu machen. Nun ist aber die Klemmenspannung an der sekundären Maschine immer kleiner als die an der primären Maschine, und zwar um so viel, als der Spannungsverlust (S. 88) beträgt, der zur Überwindung des Widerstandes der Leitung verbraucht wird. Wird daher die Leitung sehr lang, so hat man zwei Mittel, um trotzdem das Verhältnis der Spannungen beider Maschinen möglichst nahe an 1 zu bringen, die beiden Klemmenspannungen möglichst gleich zu machen. Das eine Mittel besteht darin, daß man den langen Leitungsdrähten einen großen Querschnitt gibt. Denn dadurch wird ja der Widerstand der gesamten Leitung wieder klein. Hat etwa die Leitung die doppelte Länge zu bekommen, als in einer bereits ausgeführten Anlage, und gibt man ihr nun auch den doppelten Querschnitt, so bleibt der Spannungsverlust zwischen beiden Maschinen, also auch der Nutzeffekt, ungeändert. Aber dieses Hilfsmittel ist praktisch nicht anwendbar, weil man dann bei einigermaßen großen Entfernungen sehr dicke Kupferstäbe zur Leitung nehmen müßte, welche die Kosten der Anlage überaus verteuern würden.

Das zweite Mittel aber besteht darin, daß man überhaupt die Klemmenspannungen beider Maschinen sehr groß macht. Dann macht nämlich die Abnahme der Spannung von der ersten bis zur zweiten prozentisch viel weniger aus als bei kleineren Spannungen. Nehmen wir z. B. die obige Kraftübertragungsanlage in Solothurn an. Dort war

die Klemmenspannung an der primären Maschine 1753,3 Volt,

die Klemmenspannung an der sekundären Maschine 1655,9 Volt,

also der Spannungsverlust auf der 8 km langen Leitung 97,4 Volt und das Verhältnis der beiden Klemmenspannungen, von dem der Nutzeffekt abhängt, $\frac{1655{,}9}{1753{,}3} = 0{,}944$. Der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung ist gleich dem Produkt aus den beiden industriellen Wirkungsgraden der Maschinen und diesem Verhältnis der Spannungen, also gleich

$$0{,}886 \times 0{,}903 \times 0{,}944 = 0{,}756.$$

Wäre nun die Leitung doppelt so lang, 16 statt 8 km, so würde der Spannungsverlust in der Leitung 194,8 Volt betragen. Um trotzdem dasselbe Verhältnis der Klemmenspannungen zu bekommen, würde man bloß beiden Maschinen nahezu die doppelte Klemmenspannung zu erteilen brauchen, der ersten etwa 3480 Volt, der zweiten also 3285,2 Volt. Dann wäre, trotz des größeren Spannungsverlustes in der Leitung, das

Verhältnis der Klemmenspannungen dasselbe wie in dem angeführten Fall, nämlich $\frac{3285{,}2}{3480} = 0{,}944$ und daher auch der Nutzeffekt der Kraftübertragung derselbe.

Um nun größere Klemmenspannungen zu erhalten, muß man Maschinen von hoher elektromotorischer Kraft nehmen, also im allgemeinen Dynamomaschinen, welche eine große Anzahl Drahtwindungen auf dem Anker haben. Es läßt sich also auch mit den gewöhnlichen Telegraphendrähten Arbeit auf große Entfernung mit erheblichem Nutzeffekt übertragen, wenn man nur bewirkt, daß beide Maschinen sehr hohe elektromotorische Kraft haben.

Die oben angeführten Maschinen in Solothurn haben schon eine verhältnismäßig hohe Klemmenspannung, und gerade deswegen ist der Nutzeffekt der Arbeitsübertragung dort ein so hoher.

Diese Forderung, daß zur elektrischen Kraftübertragung auf große Entfernungen die angewandten Ströme sehr hochgespannt sein müssen, hat zuerst der französische Ingenieur Marcel Deprez bestimmt ausgesprochen, und er hat unentwegt die Ansicht verteidigt, daß durch passende Konstruktion der Maschinen, d. h. durch Maschinen für hohe Spannung, man auf jede Entfernung hin Arbeit von beträchtlicher Größe mit großem Nutzeffekt übertragen kann.

Nun haben wir schon mehrfach gesehen, daß Dynamomaschinen für Gleichstrom sich für sehr hohe Spannungen — für mehr als 600 bis höchstens 1000 Volt — nicht gut bauen lassen, weil bei den einander nahen Wickelungen die Isolation kaum ausreichend gemacht werden kann, und weil ferner der Kommutator den hohen Spannungen gefährlich ist. Viel vorteilhafter sind für hohe Spannungen die Wechselstrom- und Drehstrommaschinen. Diese kann man direkt bis zu Spannungen von 10 000 Volt konstruieren und damit schon auf sehr große Entfernungen vorteilhaft Arbeit übertragen. Ferner aber kann man noch dazu bei Wechselströmen, wie wir wissen, sehr leicht durch die Transformatoren der Spannung des Stromes noch viel höhere Werte geben, wenn es darauf ankommt. Und ferner kann man an denjenigen Stellen, an denen die Arbeit gebraucht wird, die hohen Spannungen, die immer gefährlich sind, wieder vollständig beseitigen, indem man dort durch Transformatoren aus den hohen Spannungen wieder passend niedrige hervorbringt. Die Drehströme mit Transformatoren sind also das Ideal für Arbeitsübertragungen auf weite Entfernungen, sie sind auch den gewöhnlichen einphasigen Wechselströmen deswegen überlegen, weil ja die Drehstrommotoren (wenigstens bisher) viel vorteilhafter sind als diejenigen für gewöhnlichen Wechselstrom.

Von der Richtigkeit dieser Betrachtungen überzeugt, hat nun im Jahre 1891 die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin in Verbindung mit der Maschinenfabrik Oerlikon eine großartige Kraftübertragungsanlage ausgeführt, welche in einem exzeptionell schwierigen Fall die Möglichkeit der vorteilhaften elektrischen Übertragung von Arbeit mit den heutigen Mitteln beweisen sollte, nämlich die berühmte Kraftübertragung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main auf eine Entfernung von 175 km.

Es sollten von einer Wasserkraft in Lauffen zirka 200 Pferdekräfte an die dortige Dynamomaschine abgegeben werden, und es kam darauf an, möglichst viel Pferdekräfte nach Frankfurt zu bringen. Dazu war eine kolossale Spannung, 15—20 000 Volt, nötig, und diese wurde durch Drehströme mit Transformatoren hergestellt.

Die Anlage war folgende. In Lauffen wurde durch eine Turbine eine große Drehstromdynamomaschine getrieben, welche bis zu 300 Pferdekräfte aufnehmen konnte. Sie lieferte drei getrennte Ströme von je 50 Volt Spannung und bis zu 1400 Ampere Stärke. Die Ströme wurden durch kurze Kupferkabel von 27 mm Durchmesser zu dem primären Transformator, einem Öltransformator für Drehstrom (S. 431) gesendet. Dort wurden die drei Ströme von 50 Volt und 1400 Ampere transformiert in Ströme von etwa 14 000 Volt und 4,3 Ampere. Die letzteren Ströme von nur 4,3 Ampere ließen sich nun auf verhältnismäßig dünnen Drähten weiterleiten. Es wurden für die drei Ströme drei blanke Kupferdrähte von 4 mm Durchmesser benutzt, welche nun, wie Telegraphenleitungen, von Lauffen nach Frankfurt geführt wurden. Es wurden dazu zirka 3000 Stangen verwendet, welche je drei Porzellanisolatoren trugen, wie es Fig. 489 zeigt. Diese Isolatoren hatten inwendig Rinnen, die mit Öl gefüllt waren, damit nicht Elektrizität von den Drähten über die Oberfläche der Isolatoren — die immer feucht sind — zu den eisernen Trägern der Isolatoren gelangen könne und so zur Erde abgeleitet werde.

Fig. 489.

Die in Frankfurt ankommenden hochgespannten Ströme wurden nun durch weitere Öltransformatoren wieder zurücktransformiert auf etwa 100 Volt, so daß sie dann wieder Stärken bis zu 700 Ampere erhielten. Ein Teil dieser Ströme wurde zur Speisung einer Lampenbatterie von 1000 Glühlampen benutzt, ein anderer Teil derselben betrieb einige Drehstrommotoren. Von den letzteren setzte einer eine Pumpe in Bewegung, durch welche ein Wasserfall von 10 m Höhe in Frankfurt gespeist wurde. So war ein Teil der Energie des Wasserfalls in Lauffen nach vielen Umformungen und nach einem zurückgelegten Weg von 175 km wieder in die Energie eines Wasserfalls in Frankfurt verwandelt.

Der Versuch, so hochgespannte Ströme auf so weite Entfernung zu leiten, war also gelungen, und es kam darauf an, wie groß der Nutzeffekt dieser Arbeitsübertragung war. Von den vielen Experimenten,

die mit verschiedenen Belastungen der Maschinen ausgeführt wurden, soll hier, um eine deutliche Einsicht in die Verhältnisse zu gestatten, dasjenige angeführt werden, bei dem die größte Arbeit in Lauffen aufgewendet wurde.

Bei diesem Versuch lieferte die Turbine in Lauffen einen Effekt von 197,4 Pferdekräften in die Dynamomaschine. Von diesen wurden 12,6 PS im Innern der Dynamomaschine verbraucht und 184,8 gingen von den Klemmen ab in den äußeren Stromkreis, so daß der industrielle Wirkungsgrad der primären Maschine $\frac{184,8}{197,4} = 93,5$ Proz. war.

Der Strom ging nun zunächst zum primären Transformator, wo er transformiert wurde, und von den sekundären Klemmen desselben ging nach außen noch ein Effekt von 177,6 PS, so daß 7,2 PS im Transformator verbraucht wurden. Der industrielle Wirkungsgrad des primären Transformators war also $\frac{177,6}{184,8} = 96,1$ Proz., und der industrielle Wirkungsgrad der ganzen primären elektrischen Installation (Dynamomaschine und Transformator zusammen) war $\frac{177,6}{197,4} = 89,9$ Proz. Das heißt also, 89,9 Proz. der gesamten von der Turbine aufgewendeten Energie gehen in der Form von sehr hochgespanntem Strom von Lauffen weg nach Frankfurt.

In der Leitung wurden bei diesem Versuch infolge der hohen Spannung nur 25,2 PS für Joulesche Wärme verbraucht, so daß bis an die primären Klemmen des Transformators in Frankfurt noch 152,4 Pferdekräfte kamen. Der Verlust in der Leitung betrug also etwa 15 Proz.

Der Frankfurter Transformator hatte nun einen industriellen Wirkungsgrad von 95,7 Proz., d. h. er verwandelte den eingeführten hochgespannten Strom von 152,4 PS Effekt in niedrig gespannten Strom von 145,8 Pferdekräften Effekt.

Man konnte also in Frankfurt 145,8 PS von den Klemmen des Transformators als niedrig gespannten Strom von etwa 100 Volt abnehmen und beliebig verwenden für Beleuchtung, Arbeitsleistung oder dergleichen.

Daher ist der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung zwischen der Turbine in Lauffen und der Verbrauchsstelle in Frankfurt $\frac{145,8}{197,4} = 73,9$ Proz.

Wenn man die enorme Entfernung und die hohen angewendeten Spannungen bedenkt, so ist dieser Nutzeffekt ein außerordentlich großer.

Allerdings zeigt dieser Versuch auch, daß man praktisch auf so weite Entfernungen nur sehr große Kräfte übertragen kann. Denn wenn auch der Verlust an Energie ein verhältnismäßig niedriger ist, so sind doch die Kosten der Anlagen (der Stangen und Drähte) so hoch, daß sie die Rentabilität bei geringer Größe der übertragenen Arbeit aufheben. Je größer aber die ganze übertragene Arbeit ist, desto weniger kommen die Anlagekosten praktisch in Betracht.

Aber andererseits hat dieser Versuch klar gezeigt, daß die Ausführung solcher elektrischer Kraftübertragungsanlagen mit hohem Nutzeffekt jetzt überall und auf alle in Betracht kommenden Entfernungen möglich

ist. Wo also die Herleitung von Energie aus der Ferne sich rechnerisch lohnt, da besteht auch keine Schwierigkeit mehr in der praktischen Ausführung der Anlage, und in der Tat sind jetzt bereits eine größere Zahl von Kraftübertragungsanlagen ausgeführt, bei denen normal eine Spannung von 10 000 Volt in den Leitungsdrähten herrscht.

Dabei umgeht man den primären Transformator ganz, und erzeugt vielmehr in der primären Drehstrommaschine selbst die hohen Spannungen von 10 000 Volt, was man ja, wie wir wissen, erreichen kann, da dort nur in den feststehenden Windungen die hohe Spannung herrscht. Durch die Beseitigung des primären Transformators macht man den Wirkungsgrad der primären elektrischen Installation höher, weil die Verluste im primären Transformator fortfallen, und diese Erhöhung drückt sich dann auch im Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung aus.

Das Bestreben der Elektrotechnik geht aber natürlich darauf hin, zu noch viel höheren Spannungen zu gelangen. Auch liegen schon Versuche mit Kraftübertragungen von 50 000—100 000 Volt Spannung vor. Die Schwierigkeiten der Isolation wachsen aber bei diesen hohen Spannungen rapid, und außerdem ist die Gefahr solcher Anlagen, bei denen elektrische Funken auf 10—30 cm Entfernung aus den Leitungen an jeder Stelle herausschlagen können, eine sehr große. In den meisten Fällen begnügt man sich daher, Kraftübertragungen auf solche Entfernungen nur einzurichten, bei denen man mit 5000—10 000 Volt Spannung noch wirtschaftliche Resultate erzielt.

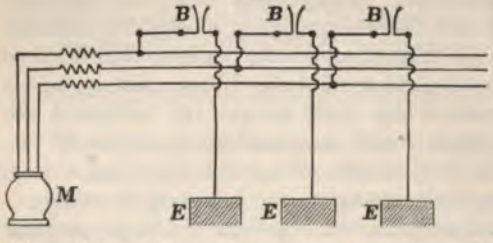
Bei Fernleitungen, die sich oft auf viele Kilometer erstrecken und welche Spannungen bis zu 10 000 Volt führen, ist eine Vorsichtsmaßregel von hoher Bedeutung, nämlich die Sicherung aller Apparate gegen B l i t z s c h l a g. Wenn irgendwo auf dem Wege der Blitz in die Leitung schlägt, so kann er, oder wenigstens ein Teil von ihm, in die Maschinen und Apparate dringen und diese zerstören. Man kann sich aber durch sogenannte Leitungsblitzableiter davor schützen. Der Blitz ist nämlich eine äußerst rasche elektrische Bewegung, die sogar häufig, wie es scheint, aus sehr raschen elektrischen Schwingungen (s. S. 264 u. folg.) besteht. Wir wissen aber, daß bei sehr raschen elektrischen Bewegungen nicht der gewöhnliche Widerstand es ist, welcher den Stromdurchgang erschwert, sondern die Selbstinduktion. Eine kleine Luftstrecke von einigen Millimetern Abstand, etwa zwischen zwei Metallplatten, läßt die Blitzentladung leicht durchgehen, obwohl der Widerstand der Luft enorm ist, während ein paar Meter Kupferdraht, namentlich wenn er spiralförmig aufgerollt ist, dem Blitz einen viel schwereren Weg bieten. Dadurch aber kann man einen Blitz, der in eine Leitung eingedrungen ist, unschädlich machen. Man schaltet nämlich an jeder Leitung, die zur Maschine führt, je ein paar solche Platten derartig ein, daß jedesmal die eine Platte mit je einer Leitung, die andere mit der Erde verbunden ist. Ein solches System nennt man einen L e i t u n g s b l i t z a b l e i t e r. Ist ein Blitz in die Leitung geschlagen, so gelangt er, bevor er an die Maschinen kommt, an diesen Blitzableiter und überspringt den Luftzwischenraum und geht zur Erde, dringt aber nicht in die Maschinen ein. Ebenso schaltet man solche Blitzableiter vor jeden zu schützenden Apparat.

Bei hochgespannten Strömen aber, um die es sich für uns jetzt handelt,

ist dabei noch eine große Schwierigkeit vorhanden. Zunächst muß natürlich der Abstand der Platten oder Drähte, die den Blitzableiter bilden, so groß sein, daß der eigentliche Maschinenstrom nicht durch die Luftschicht gehen kann, der Abstand muß größer sein als die Schlagweite, welche zu der vorhandenen Maschinenspannung gehört. Schlägt aber der Blitz in die Leitung ein und geht er durch den Blitzableiter zur Erde, so wird dadurch das Metall der beiden Blitzableiterplatten zum Teil zerstäubt und die Luft zwischen den Platten wird erwärmt, so daß nun der Maschinenstrom diesen Widerstand auch überwinden kann, es bildet sich sofort ein Lichtbogen zwischen den Platten und der Maschinenstrom fließt nun auch seinerseits durch den Blitzableiter zur Erde, wobei der Lichtbogen dauernd anhält und starke Feuererscheinungen und Feuersgefahr bietet. Der Blitz ist zwar beseitigt, aber die Maschine ist, vielleicht gleich mit allen beiden oder drei Polen, mit der Erde verbunden, der Teufel ist zwar ausgetrieben, aber nur durch Beelzebub. Man muß daher dafür sorgen, daß sofort nach einem Blitzdurchgang der entstehende Lichtbogen wieder ausgelöscht wird. Das beste und einfachste Mittel dazu sind die Hörnerblitzableiter der Siemens-Schuckertwerke, von denen Fig. 490 eine Abbildung gibt. Diese bestehen aus zwei gebogenen Stäben, welche unten einen kleinen Abstand haben, der sich nach oben immer mehr erweitert. Bildet sich durch den Blitz unten an der engsten Stelle ein Lichtbogen, so wird dieser sofort, da die erwärmte Luft nach oben dringt, aufwärts getrieben, er wandert den Hörnern entlang nach oben, bis der Abstand so groß geworden ist, daß die Maschinenspannung ihn nicht überwinden kann. Dadurch verlöscht er ganz von selbst. In Fig. 491 ist gezeichnet, wie diese Blitzableiter in der Nähe einer Drehstrommaschine angebracht werden. Von jeder der drei Leitungen führt ein kurzer, etwas gewundener Draht zu dem einen Horn des Blitzableiters B, und von dessen anderem Horn geht ein gerader Draht zu einer in der Erde vergrabenen Platte E. Dadurch ist die Maschine geschützt. Ebensolche Vorsichtsmaßregeln ergreift man bei den Transformatoren, bei den Motoren und auf der Fernleitung in gewissen Abständen. In Fig. 492 ist dargestellt, wie ein Lichtbogen in einem solchen Hörnerblitzableiter aussieht. Es ist dies eine Momentaufnahme. Die Fußpunkte der einzelnen Entladungen wandern rasch nach aufwärts, und in 2 Sekunden ist der Lichtbogen erloschen.

Fig. 490.

Fig. 491.



Die Kraftübertragungen auf größere Entfernung beginnen jetzt eine große Rolle in der Industrie zu spielen, ja sie bilden in Verbindung mit der Verteilung der Kraft eine der wichtigsten Aufgaben der Industrie im allgemeinen und der Elektrotechnik im besonderen. Denn da es jetzt auf einfache Weise möglich ist, beliebig vielen Maschinen elektrisch von einer Stelle aus die Kraft zuzuführen, so ist dadurch eine eigentümliche Kombination von Zentralisierung und Dezentralisierung der Arbeit ermöglicht, für die es bisher kein Beispiel gab, die aber jetzt in manchen Industriegegenden schon praktisch durchgeführt wird. Bisher nämlich konnten nur die ganz großen Fabriken aller der Vorteile teilhaftig werden, welche einerseits sehr große Wasserkräfte, andererseits sehr große Dampfmaschinen bieten. Diese liefern ja die Kräfte außerordentlich viel billiger, um den dritten Teil bis zur Hälfte der Kosten, als kleine Turbinen, kleine Dampfmaschinen. Wo also große Maschinen, sei es von Dampf, sei es von Wasser getrieben, aufgestellt waren, da konnte sich, in nächster Nähe derselben, eine große Industrietätigkeit entwickeln, der Betrieb war ein rein zentralisierter. Jetzt aber ist es möglich, solche große Maschinen, solche große Wasserkräfte zu benutzen und auf elektrischem Wege diese Kräfte in weitem Umfange, auf viele Ortschaften zu verteilen, also die Vorteile der zentralisierten Krafterzeugung mit denen des dezentralisierten Kraftverbrauchs zu verbinden. So entstehen z. B. an der Oberspree, in Sachsen, in der Nähe des Rheinfalls, bei München große Industriegegenden, in welchen die Krafterzeugung auf eine Stelle konzentriert ist, während durch elektrische Kraftübertragung die Vorteile dieser konzentrierten Erzeugung allen einzelnen, selbst den kleinsten Industriellen zu gute kommen. Es ist kein Zweifel, daß diese lebenskräftige Kombination sich allmählich immer weiter ausbreiten wird, und man kann daher ruhig, ohne von der Zukunft desavouiert zu werden, die Prophezeiung aussprechen, daß der elektrischen Kraftübertragung und Kraftverteilung die Zukunft gehört.

Fig. 492.

9. Kapitel.

Die Verteilung elektrischer Energie.

Mit der wachsenden Ausdehnung der Benutzung des elektrischen Stromes wuchsen auch in ungeahntem Maße die Anforderungen, welche an die Elektrotechnik gestellt wurden. War man anfangs schon zufrieden, wenn man in einzelnen Räumen einige Bogenlampen von einer Maschine aus treiben lassen konnte, so kam bald durch das elektrische Glühlicht die Forderung an die Elektrotechnik heran, eine größere oder kleinere Anzahl von Glühlampen so von einer Quelle aus mit Strom zu versorgen, daß jede Lampe unabhängig von der anderen wäre und beliebig, ohne die anderen zu stören, angezündet oder ausgelöscht werden könne. Als dies erreicht war, trat als nächste Aufgabe die hervor, auch Bogenlampen und Glühlampen zusammen in demselben Kreise zu betreiben. Solange solche Betriebe sich auf einzelne Gebäude oder Räume erstreckten, waren diese Forderungen nicht allzu schwer zu erfüllen. Große Schwierigkeiten traten erst ein, als man daran ging, ganze Stadtteile, ja ganze Städte mit Bogenlicht und Glühlicht zu beleuchten, wobei immer die Forderung der gänzlichen Unabhängigkeit aller einzelnen Beleuchtungsobjekte obenan gestellt war. Zu diesen Forderungen an die Zentralisation trat dann bald noch die hinzu, den Strom nicht nur zu Beleuchtungszwecken, sondern auch zu Arbeitszwecken durch Elektromotoren und jetzt auch zu Heizzwecken zu liefern. Es mußten so direkte Methoden für die Verteilung der elektrischen Energie ausgearbeitet werden, welche mit den wachsenden Anforderungen auch immer schwieriger und komplizierter wurden.

Eine Reihe von Bogenlampen von derselben Maschine zu speisen, bot nach Erfindung der Differentiallampe keine erheblichen Schwierigkeiten mehr. Man schaltet die Bogenlampen hintereinander in einen Kreis, und durch die feine Regulierung der Differentiallampe ist jede Lampe unabhängig von der anderen. Allerdings wird bei einer Anzahl hintereinander geschalteter Bogenlampen die notwendige Spannung des Stromes bald sehr groß. Da jede Bogenlampe etwa 45 Volt Spannung an ihren Klemmen gebraucht, so muß ein Strom, der 20 Bogenlampen hintereinander speisen soll, schon etwa 1000 Volt Spannung haben, wenn man den Spannungsverlust in der Leitung berücksichtigt. Mit Gleichstrommaschinen und namentlich mit Wechselstrommaschinen lassen sich solche Spannungen jetzt sicher erzielen, und die billigste und einfachste Art, eine Reihe von Bogenlampen allein zu treiben, ist daher die der Hintereinanderschaltung. Sie ist anwendbar vor allem immer dann, wenn jede Gefahr, daß Unberufene die Leitungsdrähte berühren können, ausgeschlossen ist. Sie ist aber nicht anwendbar, wenn die hochgespannten Ströme in bewohnte Räume eingeführt werden müssen, da sie dann zu Unglücksfällen führen könnte. Ein anderes System der Bogenlichtbe-

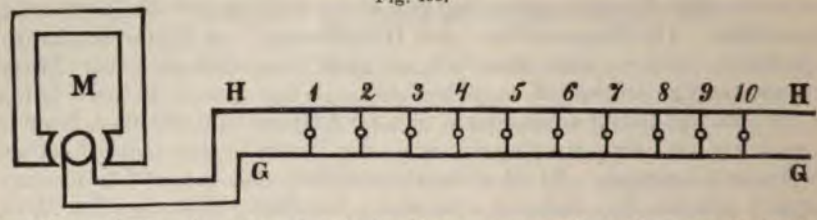
leuchtung wurde zuerst von Gülcher praktisch ausgearbeitet, nämlich das der Parallelschaltung von Bogenlampen. Von der Maschine gehen dabei zwei Leitungsstränge — voneinander isoliert — aus, welche eine Spannungsdifferenz von 50 bis 65 Volt haben. Zwischen diese Leitungsstränge werden die Bogenlampen alle nebeneinander geschaltet und zwar jede noch mit einem besonderen Widerstand. Dieser Widerstand verbraucht einen Teil der 50 bis 65 Volt, und jede Lampe bekommt dann ihre notwendige Klemmenspannung von 40 bis 45 Volt und ihre notwendige Stromstärke. Die Stromstärke in den Hauptleitern, von denen die Lampen abgezweigt werden, muß natürlich so groß sein, daß sie jeder Lampe ihre notwendige Intensität abgeben kann. Wenn also z. B. jede Lampe bei 50 Volt Spannung einen Strom von 10 Ampere zum Brennen braucht, so muß, bei 20 Lampen nebeneinander, der Strom in den Hauptleitungen 200 Ampere betragen. Es ist selbstverständlich, daß sowohl bei der einen (Serien-) wie bei der anderen (Parallel-) Schaltung man dieselbe Menge benutzter Energie hat, abgesehen von den Verlusten in den Leitungen. Bei der Serienschaltung braucht man bei 20 Lampen in diesem Falle einen Strom von 10 Ampere mit 1000 Volt Spannung, also im ganzen 10 000 Watt Effekt (ohne die Verluste), und bei der Parallelschaltung braucht man einen Strom von 200 Ampere mit 50 Volt Spannung, also wieder 10 000 Watt Effekt. Der Unterschied liegt bei beiden Schaltungsweisen wesentlich in dem Aufwand für das Leitungsmaterial.

Die Frage nach der zweckmäßigen Verteilung der Elektrizität auf viele einzelne Verbrauchsstellen wurde aber erst dringend, als Edison die Glühlichtbeleuchtung in die Praxis einführte. Beim Bogenlicht hatte man höchstens 40 bis 50 Verbrauchsstellen einzurichten, die unabhängig voneinander sein sollten, beim Glühlicht ging aber diese Zahl sofort in die Tausende. Außerdem waren die vielen Bogenlampen, die von einer Maschine zu speisen waren, gewöhnlich in der Benutzung eines einzelnen, z. B. einer Stadtverwaltung bei Straßenbeleuchtungen, und es konnte ihr Betrieb im voraus geregelt werden. Beim Glühlicht aber traten sofort eine große Anzahl von Benutzern (Abonnenten) ein, von denen einer um den anderen sich nicht zu kümmern hatte, und jeder wollte immer genau so viel Lampen löschen oder brennen können, als er gerade brauchte, ohne nach seinem Nachbar zu fragen. Es mußte also die volle Unabhängigkeit jeder Lampe von der anderen hervorgebracht werden, während sie alle in einem Stromkreise sich befinden, d. h. von einer Maschinenstation aus gespeist werden.

Edison selbst war es, der sofort bei der Einführung des Glühlichts auch die praktische Lösung für diese Verteilung fand. Er schaltete nämlich die Lampen alle nebeneinander (parallel), also so, wie es in Fig. 493 gezeichnet ist, in welcher M die Maschine und 1, 2, 3 bis 10 die Lampen sind. Durch die Nebeneinanderschaltung der Lampen wird der gesamte Widerstand des äußeren Stromkreises kleiner als der jeder einzelnen Lampe. Haben die Verbindungsdrähte (welche man ja beliebig stark nehmen kann) einen sehr kleinen Widerstand, der in der folgenden Betrachtung vernachlässigt werden möge, dann herrscht an den Enden jeder Lampe dieselbe Spannungsdifferenz, nämlich diejenige, welche an den Endklemmen der Maschine vorhanden ist. Die Leitungen von den

Endklemmen der Maschine bis zu den letzten Lampen macht man dabei so dick, gibt ihnen einen so geringen Widerstand, daß der Spannungsverlust (Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand) nur 2 bis 3 Proz. beträgt. Solange daher die Spannungsdifferenz an den Enden der Maschine (die Klemmenspannung) dieselbe bleibt, solange ist auch die Stromstärke in jedem Zweig, da dessen Widerstand unverändert ist,

Fig. 493.



dieselbe, solange brennt also jede Lampe normal und unveränderlich. Und daraus ergibt sich, daß alle Lampen vollständig unabhängig voneinander sind, daß man beliebig viele auslöschen oder einschalten kann, wenn nur dafür gesorgt wird, daß die Klemmenspannung an den Enden der Maschine dauernd dieselbe bleibt.

Diese Lösung der Aufgabe läßt sich aber sofort auch auf den Fall erweitern, wie zuerst Deprez zeigte, daß der Strom von der Maschine nicht nur zum Betrieb von Glühlampen benutzt werden soll, sondern daß er auch zum Betrieb von elektrischen Motoren verwendet werden soll. Schaltet man in Fig. 493 an Stelle der Lampen 1, 2 bis 10 je einen elektrischen Motor ein und hält man an den Enden der Maschine die Spannung dauernd konstant, so fließt durch jeden Motor ein Strom von der Stärke, wie er der von ihm geleisteten Arbeit entspricht. Aber jeder Motor ist dabei ganz unabhängig von dem anderen. Die konstante Klemmenspannung ist hinreichend, aber auch notwendig, um alle Forderungen des gemischten Betriebes von Glühlampen und Motoren zu erfüllen. Natürlich müssen die Motoren so konstruiert sein, muß der Widerstand ihrer Wickelung so abgemessen sein, daß sie bei der konstant gegebenen Klemmenspannung die maximale von ihnen verlangte Arbeit leisten können. Ebenso können auch an Stelle der Lampen 1 bis 10 Heizapparate eingeschaltet werden, die auch für konstante Klemmenspannung konstruiert werden.

Bei diesem System der Parallelschaltung aller Verbrauchsapparate ist es nun notwendig, daß man eine normale Spannungsdifferenz festsetzt, welche in dem Leitungssystem herrschen soll. Denn es müssen eben alle Glühlampen, Motoren und Heizapparate so konstruiert sein, ihr Widerstand muß so abgemessen sein, daß sie bei der gegebenen Spannung gerade die zu ihrem normalen Betriebe nötige Stromstärke erhalten.

Es hat sich nun nach dem Vorgang von Edison eingebürgert, bei Gleichströmen eine Spannungsdifferenz von zirka 110 Volt (100 bis 110 Volt) in den Hauptleitungen anzuwenden. Die Glühlampen für große Anlagen werden also so konstruiert, daß sie bei dieser Spannung gerade die normale Lichtstärke (gewöhnlich von 16 Kerzen) geben, und ebenso werden auch die Motoren und die Heizapparate für diese

Spannung eingerichtet. Zwischen zwei solche Leiter, die 110 Volt Spannungsdifferenz haben, kann man nun auch Bogenlampen einschalten. Denn da eine Bogenlampe zirka 45 Volt Spannung braucht, so kann man immer 2 Bogenlampen hintereinander mit einem Widerstand zwischen die Leitungsstränge schalten, und auch diese erhalten dann ihren normalen Strom. Ebenso kann man aber auch Glühlampen von geringer Leuchtkraft, die weniger Spannung bedürfen und vertragen, zwischen die Leitungen von 110 Volt Spannungsdifferenz einschalten. Nur muß man von diesen eben so viel hintereinander schalten, daß die Summe ihre Spannungen 100 bis 110 Volt ausmacht, also z. B. 4 Glühlampen von 25 Volt, oder 13 Glühlampen von 8 Volt.

Bei Wechselstromanlagen wird auch zuweilen die Spannungsdifferenz von 100 bis 110 Volt gewählt, manchmal aber auch nur eine von 65 bis 72 Volt, weil nämlich bei dieser Spannung schon 2 Wechselstrombogenlampen (à zirka 30 Volt) mit einem Widerstand eingeschaltet werden können.

Dieses System der Parallelschaltung ist also ganz ausgezeichnet geeignet, eine Verteilung der elektrischen Energie zu liefern, die allen Anforderungen entspricht.

Die Hauptforderung dabei ist, daß die Klemmenspannung an der erzeugenden Maschine dauernd konstant erhalten wird. Zu dem Zwecke muß der Maschinist an einem Voltmeter die Spannung dauernd kontrollieren und muß durch Regulierung des Nebenschlusses an der Maschine die Spannung sofort wieder auf den normalen, vorgeschriebenen Wert bringen, wenn sie sich verändert.

Die Einschaltung der Widerstände in den Nebenschluß wird übrigens nicht immer durch den Maschinisten mit der Hand bewirkt, sondern geschieht zuweilen selbsttätig, durch geeignete, von den Strömen erregte Elektromotoren.

Ferner wird die Erzeugung einer großen Menge von Elektrizität, die sich auf sehr viele Gebrauchsapparate verteilt, zweckmäßig nicht von einer einzelnen Dynamomaschine besorgt, sondern von mehreren, die man nach Bedarf einschaltet. Denn der Bedarf an Elektrizität ist bei der Verteilung der Elektrizität ein sehr wechselnder. Die Lampen brennen größtenteils nur des Abends und während eines Teiles der Nacht, die Motoren laufen hauptsächlich während des Tages. Man stellt deswegen in den Zentralstationen mehrere Maschinen auf, von denen jede nur einen Strom von einer gewissen Maximalstärke liefert, und erst wenn mehr Strom gebraucht wird, als diese eine Maschine liefert, schaltet man eine zweite, dritte Maschine ein. Diese Maschinen werden immer parallel geschaltet, und zu dieser allmählichen Einschaltung, von der die Konsumenten nichts merken dürfen — es darf sich z. B. die Lichtstärke der Lampen nicht vergrößern noch verringern —, gehören besondere Einrichtungen, die wir aber nicht erörtern können.

Von der Dynamomaschine aus oder, besser gesagt, von ihren beiden Polen gehen nun zunächst Drähte (oder Kabel) zu einem Schaltbrett, welches alle notwendigen Apparate, Voltmeter, Amperemeter, Ausschalter, Widerstände für den Nebenschluß und den Hauptstrom, Bleisicherungen u. s. w. enthält. Sind in der Zentralstation mehrere

Maschinen vorhanden, so werden deren Pole alle durch je einen Ausschalter hindurch mit zwei Schienen auf dem Schaltbrett, den sogenannten Sammelschienen, verbunden, so daß dadurch die Maschinen alle parallel geschaltet sind. Von den Sammelschienen geht nun eine doppelte Hauptleitung durch die Stadt, welche unterirdisch gelegt ist und welche aus Kabeln von großem Querschnitt besteht, da sie die starken Hauptströme zu führen hat. In jede Straße gehen nun wieder Kabel von geringerem Querschnitt, und zwar von jedem Hauptkabel aus eines. Noch geringeren Querschnitt haben die Leitungen, die in die Nebenstraßen führen, und endlich noch kleineren diejenigen, die in die einzelnen Häuser führen. Die Einrichtung ist also ganz analog wie bei der Gasleitungseinrichtung.

Für diese Leitungen verwendet man jetzt häufig Kabel, die aus einer inneren Kupferseele und einem konzentrischen, aus Drähten gebildeten

Fig. 494.

Kupferleiter bestehen, so daß die eine Leitung ganz von der anderen umgeben ist. Es sind also dann beide Leitungen in demselben Kabel enthalten. Der äußere Leiter ist mit Isolationsmasse umgeben, und über der Isolationsmasse befindet sich ein Bleimantel und darüber häufig noch eine sogenannte Eisenarmierung, d. h. eine Hülle aus Eisenband. Für Drehströme braucht man natürlich drei Kabel.

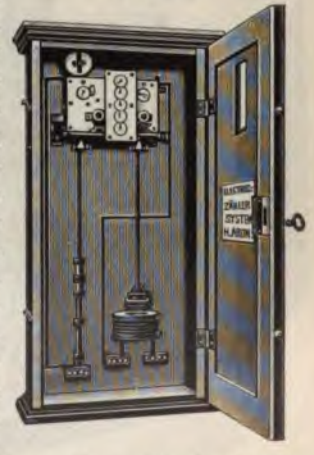
Die Abzweigungen von den Hauptkabeln, sowie die von den Nebenkabeln und endlich die Lampen und Motoren jedes einzelnen Hauses sind alle nebeneinander geschaltet. Da, wo die Nebenleitungen von den Hauptleitungen abgezweigt werden, werden Abzweigkasten angewendet, welche diese Abzweigungsstellen enthalten. Fig. 494 zeigt einen solchen Abzweigkasten für eine Drehstromleitung. In dem Kasten findet die Abzweigung der Nebenleitungen von den Hauptleitungen statt. Die drei Kabel für die Drehströme liegen rechts und links in Stahlrohren und diese werden durch Stutzen in den Abzweigkasten eingeführt. Die

Abzweigung selbst geschieht im Kasten an Porzellanscheiben durch Klemmen. Die drei abgezweigten Kabel werden oben durch ein Stahlrohr hinausgeführt.

Wenn auf diese Weise die elektrische Energie mit Sicherheit verteilt wird und jeder Konsument infolge der Parallelschaltung mit konstanter Spannung unabhängig von allen anderen ist, so ist nur noch eine Sache von höchster Bedeutung. Es muß nämlich jeder Konsument wissen, wie viel Elektrizität er verbraucht hat, und es muß auch die Gesellschaft, die die Elektrizität liefert, wissen, wie viel Elektrizität etwa in jeder Wohnung, die elektrisch beleuchtet ist, konsumiert worden ist, weil sich danach der zu zahlende Preis richtet. Es handelt sich also um die Anbringung von Elektrizitätsmessern.

Solche Elektrizitätszähler oder Verbrauchszähler kann man auf verschiedene Weise konstruieren. Die Aufgabe ist, die in einer bestimmten Anlage, etwa in einer Wohnung, während einer gewissen Zeit (etwa 1 Monat) konsumierte elektrische Energie zu messen. In jeder Sekunde leistet nun ein elektrischer Strom eine Arbeit, welche gleich dem Produkt seiner Spannung (in Volt) und seiner Stromstärke (in Ampere) ist. Die Zahl der Watt (Volt-Ampere) eines Stromes gibt also die in jeder Sekunde vom Strom geleistete, also zugleich die vom Konsumenten verbrauchte elektrische Energie an. Diese mit der ganzen Verbrauchszeit multipliziert, gibt die gesamte verbrauchte Energie. Die Verbrauchszeit wird gewöhnlich in Stunden gerechnet, und daher ist die Zahl der Wattstunden dasjenige, was der Verbrauchsmesser konstatieren soll. Wäre die Spannung des Verteilungsnetzes durchaus konstant, sagen wir 110 Volt, so brauchte der Verbrauchszähler nur die Zahl der Amperestunden zu messen (Produkt aus der Stromstärke und der Zeit). Denn diese Zahl der Amperestunden mit 110 multipliziert gibt dann die Zahl der Wattstunden. Gewöhnlich aber ist die Spannung der Anlagen nicht so absolut konstant und es müssen daher Apparate benutzt werden, die direkt die Wattstunden messen, weil das diejenige Größe ist, für deren Lieferung die Gesellschaft einen Geldaufwand, meistens in Form von Kohlenverbrennung, zu machen hat und die daher der Konsument nach festgesetztem Einheitspreis zu bezahlen hat.

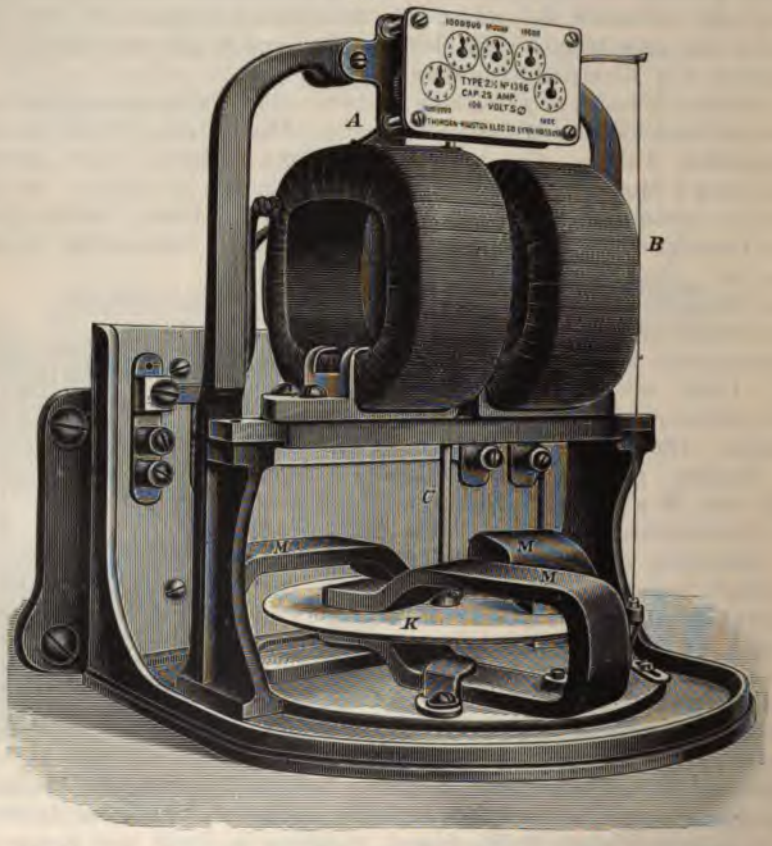
Fig. 495.



Der Wattstundenzähler von Aron mißt die Wattstunden dadurch, daß er das Produkt aus den Ampere und den Volt, also die Watt durch die Kraft bestimmt, welche zwei stromdurchflossene Rollen aufeinander ausüben, und die Zeit zugleich durch ein Pendel mißt. Zu dem Zweck sind in dem Apparat (Fig. 495) zwei Pendel angebracht von gleicher Länge und gleichem Gewicht, von denen jedes auf ein Uhrwerk wirkt. Wenn die beiden Pendel nur unter dem Einfluß der Erdschwere schwingen, wie es gewöhnlich der Fall ist, so gehen beide gleich rasch, die beiden

Uhrwerke haben dasselbe Tempo. Mit den beiden Uhrwerken ist nun ein Zeiger so verbunden, daß er nur durch die Differenz ihrer Geschwindigkeiten in Bewegung versetzt wird. Solange also nur die Erdschwere auf beide Pendel wirkt, bewegt sich der Zeiger nicht, trotzdem beide Pendel schwingen. Nun ist aber das Ende des einen Pendels (in der Figur des rechten) mit einer Drahtrolle aus feinem Draht versehen und unterhalb derselben befindet sich, fest aufgestellt, eine Drahtrolle aus dickem Draht.

Fig. 496.



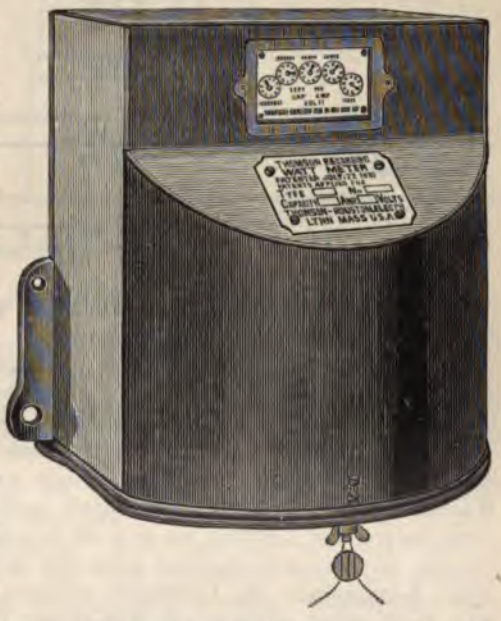
Geht durch jede dieser Rollen ein Strom hindurch, so wirken diese ja aufeinander mit einer Kraft, die von dem Produkt der Stromstärke abhängt und die wir als elektrodynamische Kraft früher kennen gelernt haben. Das Pendel steht jetzt also unter der Wirkung zweier Kräfte, nämlich der Erdschwere und der elektrodynamischen Kraft der Ströme, und es schwingt infolgedessen rascher. Dadurch kommt nun aber der Zeiger in Bewegung und man sieht leicht ein, daß sein Weg gerade von dem Produkt aus den beiden Stromstärken und der Dauer des Stromes abhängt.

Durch die feste Rolle wird nun der Hauptstrom selbst geschickt, die bewegliche Rolle aber ist direkt zwischen die beiden Hauptleitungen

des Hauses eingeschaltet. Da nun ihr Widerstand unveränderlich ist, so ist der Strom, der die bewegliche Rolle durchfließt, nur abhängig von der Spannung zwischen den Hauptleitern und daher ist die elektrodynamische Kraft zwischen den beiden Rollen von dem Produkt der Spannung und der Stromstärke, also direkt von den zu messenden Watt abhängig. Das Differentialuhrwerk mißt daher das Produkt aus den Watt und der Zeit, also die Wattstunden. Die Zifferblätter geben direkt die Energie und zwar die Hektowattstunden an, indem das erste die Einer, das zweite die Zehner u. s. w. der Hektowattstunden zeigt. Zugleich sieht man, daß dieses Instrument nicht bloß für Gleichstrom, sondern auch für Wechselstrom geeignet ist. Denn die Kraft zwischen den Strömen in den beiden Rollen ist dieselbe, wenn der Strom in beiden zugleich umgekehrt wird.

Ein anderer sehr brauchbarer und verbreiteter Elektrizitätszähler, der aus Amerika herübergekommen ist, ist der Thomson-Houston-Zähler, welcher von der Elektrizitäts-Gesellschaft Union (U. E.G.) in Berlin verbreitet wurde. Man sieht die innere Einrichtung desselben in Fig. 496. Der Zähler ist ein Elektromotor ohne Eisen, der eine Kupferscheibe zwischen Magnetpolen dreht. Die Arbeit des Stromes wird zur gleichmäßigen Drehung dieser Scheibe, die ja durch die Magnetpole gedämpft wird (S. 222), verwendet, und die Geschwindigkeit dieser Drehung ist daher ein Maß für die verbrauchten Watt. An Stelle der Feldmagnete eines Elektromotors sieht man hier zwei Spulen A und B von dickem Draht, durch welche der Hauptstrom geleitet wird. Zwischen ihnen befindet sich der Anker, auch ohne Eisen, aber in Form einer Trommel gewickelt, mit vertikaler Achse c. Die Trommelwickelung wird zwischen die Leitungen eingeschaltet, zwischen denen die betreffende Spannung herrscht, und es wird vor sie noch ein Widerstand vorgeschaltet. Die Trommel kommt in Drehung und würde ihre Geschwindigkeit immer weiter steigern, wenn nicht die eingeleitete Energie zur Leistung einer Arbeit verbraucht würde. Diese Arbeit besteht in der Drehung der unten sichtbaren Kupferscheibe K zwischen den Polen der drei Hufeisenmagnete M M M. Der Anker und die Scheibe kommen also in gleichmäßige Drehung und treiben dadurch mittels Zähnen die Räder, welche ihre Zeiger auf den Zifferblättern oben haben, an denen man nun direkt Wattstunden abliest, wenn der Apparat auf diese abgeglichen ist. Das geschieht durch Ver-

Fig. 497.

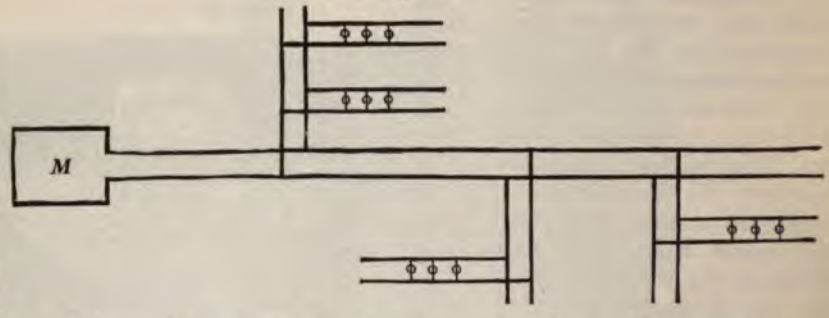


änderung des Vorschaltwiderstandes oder durch Lagenänderungen der Magnetpole. Fig. 497 zeigt die äußere Ansicht des geschlossenen Zählers. Für Wechselströme und Drehströme wird ein ähnlicher Apparat mit einem Induktionsmotor (S. 498) benutzt.

Auf gleichen oder ähnlichen Prinzipien beruhen die meisten sonst in Gebrauch stehenden Elektrizitätszähler.

Bisher hatten wir immer angenommen, daß die Zuleitung des Stromes von der Zentrale nach den einzelnen Verbrauchsstellen so geschieht, daß von der Maschine die beiden Hauptleiter, von etwa 110 Volt Spannung, ausgehen, daß von diesen sich für die einzelnen Straßen oder Häuserkomplexe wieder je zwei Leiter abzweigen und so weiter. Das Schema

Fig. 498.



dieser Leitungsführung ist in Fig. 498 angegeben. Man nennt dieses System das Zweileitersystem.

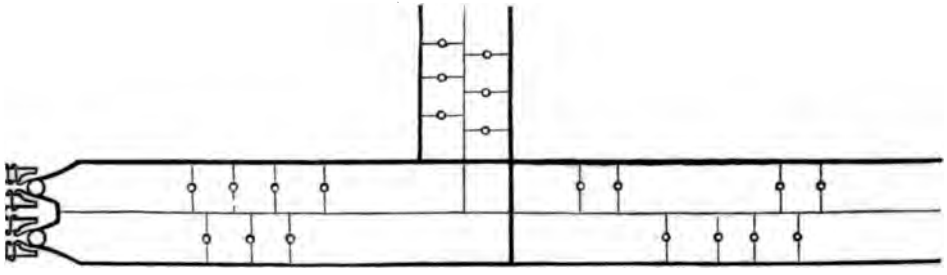
Dieses System ist zwar das einfachste und übersichtlichste, aber zugleich für größere Entfernungen ein sehr teures. Denn da die Hauptleitungen den Strom für alle Verbrauchsapparate führen müssen, also sehr große Stromstärken vertragen müssen, so müssen sie außerordentlich geringen Widerstand haben, damit einerseits nicht zu viel Joulesche Wärme entwickelt wird und damit andererseits der Spannungsverlust vom Anfang der Leitung bis zum Ende ein geringer ist, wie er es bei dem System der Parallelschaltung auch nur sein darf. Daher muß man sehr dicke Kupferstäbe als Leitungen nehmen, und es hat sich gezeigt, daß man nicht mehr ökonomisch mit dieser Verteilung arbeiten kann, wenn die letzte Lampe mehr als 800 m von der Maschine entfernt ist. Das Zweileitersystem eignet sich also nur für Bezirke bis zu 800 m Radius.

Um größere Bezirke mit Strom versorgen zu können, gingen Edison und Hopkinson zu einer Kombination über, die sich als sehr vorteilhaft erwiesen hat und die man das Dreileitersystem nennt. Bei diesem werden in der Zentrale zwei Maschinen, die je 110 Volt Spannung an ihren Klemmen haben, hintereinander geschaltet, so daß an ihren äußeren Klemmen 220 Volt Spannung herrschen. Von den beiden Endklemmen, aber auch von den miteinander verbundenen Mittelklemmen geht nun je eine Leitung durch die Stadt. Die mittlere Leitung nennt man die Kompensationsleitung. Zwischen die Mittelleitung und die eine resp. die andere der Hauptleitungen werden nun die Lampen, Motoren etc. parallel geschaltet, wie es Fig. 499 zeigt, so daß diese an ihren

Enden doch nur 110 Volt Spannung besitzen. Aber die beiden Hauptleitungen können jetzt, da sie die Verbrauchsenergie bei doppelter Spannung führen, geringeren Querschnitt haben. Allerdings kommen noch die Kosten der doppelten Maschine, der Mittelleitung und der größeren Zahl von Regulierungs- und Meßapparaten hinzu, so daß dieses System sich doch nur für eine Fläche bis zu 1200 m Radius als vorteilhaft erweist. Dabei konstruiert man übrigens jetzt häufig die Motoren für 220 Volt Spannung, so daß man diese direkt zwischen die beiden Außenleiter einschaltet. Man bemüht sich auch, Glühlampen für 220 Volt herzustellen, doch bisher noch ohne viel Erfolg. Nur die Nernstlampen werden leicht für 220 Volt konstruiert.

Bei diesen Stromverteilungen werden die Maschinen möglichst in der Mitte des Netzes aufgestellt, welches mit Strom zu versorgen ist.

Fig. 499.



Gewöhnlich wird jetzt auch noch in dem Maschinenhaus eine Akkumulatorenbatterie aufgestellt, wodurch, da die Akkumulatoren in den Zeiten des geringsten Strombedarfs geladen werden, eine rationelle Ausnutzung der Maschinenanlage möglich ist, die auch an sich dadurch kleiner gewählt werden kann.

Beim Dreileitersystem, das bei einigermaßen großen Anlagen mit Gleichstrom jetzt immer gewählt wird, braucht man zunächst zwei Dynamomaschinen für je 110 Volt Spannung. Man kann aber auch statt dessen eine Akkumulatorenbatterie von 220 Volt Spannung mit einer einzigen Dynamomaschine für 220 Volt Spannung anwenden. Dann läßt man nämlich die Akkumulatoren von der Maschine laden und führt von den Endklemmen der beiden äußersten Akkumulatorzellen und von der mittelsten Zelle aus die drei Drähte durch die Stadt. Man hat sich vielfach bemüht, bei dem Dreileitersystem auch in Fällen, wo keine Akkumulatorenbatterie vorhanden ist, mit einer einzigen Dynamomaschine von 220 Volt auszukommen. Das wird sicher und ohne große Verteuerung der Maschinen erreicht durch den sogenannten Spannungsteiler, der von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) in Berlin konstruiert wird. Es werden nämlich bei einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine für 220 Volt zwei einander gerade gegenüberliegende Spulen des Ankers (Trommel oder Ring) verbunden mit zwei Schleifringen auf der Achse, an welchen Bürsten schleifen. Wir wissen, daß in jeder einzelnen Spule bei der Rotation Wechselströme erzeugt werden. Es gehen daher auch von den Bürsten bei dieser An-

ordnung Wechselströme aus. Diese werden nun durch eine feststehende Rolle von hoher Selbstinduktion geleitet, welche am besten auf einen Eisenring aufgewickelt ist (eine Drosselspule). Wegen der hohen Selbstinduktion ist der Strom in dieser Leitung immer gering. In der mittelsten Windung dieser Rolle herrscht aber eine Spannung, welche immer gerade in der Mitte zwischen den Spannungen der Endklemmen der Maschine liegt. Haben also die beiden Endklemmen die Spannungen 100 Volt und — 100 Volt, so herrscht an dieser Stelle gerade die Spannung 0 Volt. An diesen Punkt kann man nun den Mittelleiter im Dreileitersystem ohne weiteres anlegen. Fig. 500 zeigt diese Anordnung. Man sieht oben die Gleichstrommaschine mit ihrem gewöhnlichen Kommutator, an dem die Bürsten B_1 und B_2 schleifen. Außerdem sieht man die Schleifringe mit den Bürsten a und b, von denen der Wechselstrom zu dem Spannungsteiler S geht. An den Punkt 0 dieses Apparats wird der Mittelleiter N angelegt, während die beiden äußeren Leiter L_1 und L_2 von den Bürsten B_1 und B_2 ausgehen. Die Ansicht eines solchen Spannungsteilers, der wie ein Transformator gebaut ist und keine Bedienung braucht, da er keine beweglichen Teile enthält, zeigt Fig. 501. Die Siemens-Schuckertwerke bauen Dreileiterdynamos, bei denen ohne besondere Nebenapparate durch Zusatzwicklung im Anker die Spannungsteilung bewirkt wird.

Fig. 500.

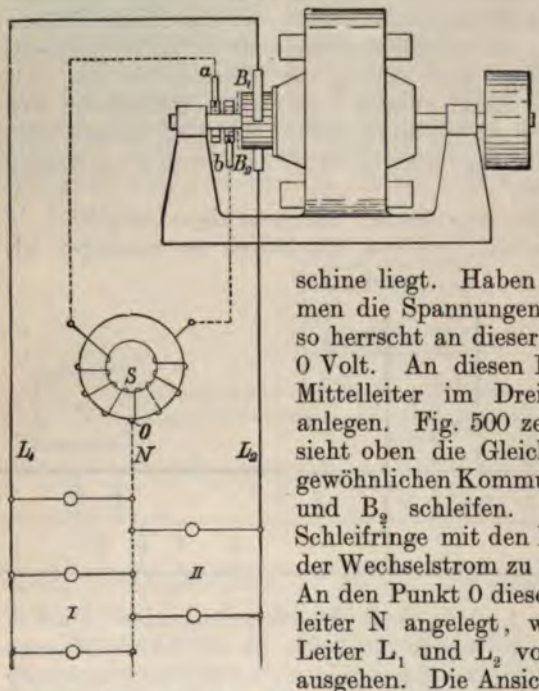


Fig. 501.

Das Dreileitersystem ist äußerst bequem für die Verteilung der Energie, und ist auch, wie erwähnt, bis zu Entfernungen von 1200 m rings um die Zentrale noch praktisch. Will man größere Bezirke mit Gleichstrom versorgen, so muß man mehrere Zentralen errichten, wie es z. B. in Berlin der Fall ist, oder man muß Unterstationen einführen, in denen Akkumulatorenbatterieen stehen, die nun selbst wieder ihren Bezirk mit Strom versorgen.

Vorteilhafter aber tritt für solche größere Entfernungen zwischen der Zentralstation und den Verbrauchsapparaten das System der Wechselströme oder Drehströme in Verbindung mit Transformatoren ein.

Der große Vorzug der Anwendung von Wechselströmen mit Transformatoren beruht darin, daß man durch die Hauptleitungen die elektrische Energie in der Form von hochgespannten Strömen von geringer Intensität sendet und sie an den Verbrauchsstellen durch die Transformatoren wieder in Ströme von geringer Spannung und großer Intensität umsetzt. Daher können die Hauptleitungen ohne Schaden große Widerstände haben, d. h. man kann dünne Leitungsdrähte anwenden und auf weite Entfernungen billig die elektrische Energie fortleiten.

Die einzelnen Verbrauchsapparate, alle Lampen, Motoren müssen natürlich auch da unabhängig voneinander sein und müssen mit geringen Spannungen, gewöhnlich 110 Volt, arbeiten, wie beim gewöhnlichen Zweileitersystem.

Diese Forderungen werden dadurch erfüllt, daß man alle Transformatoren, d. h. deren primäre Wickelungen, zwischen die Hauptleitungen parallel schaltet.

Bei dieser Stromverteilung wird also an irgend einer Stelle, die auch ganz außerhalb des Bezirks liegen kann, welcher mit Strom versorgt wird, eine Maschine für gewöhnlichen Wechselstrom oder für Drehstrom aufgestellt. Ist die zu liefernde Energie sehr groß, so stellt man mehrere Maschinen auf, die alle parallel geschaltet werden, was zwar früher ziemliche Schwierigkeiten machte, jetzt aber sich in sicherer Weise bewerkstelligen läßt. Die Ströme dieser Maschinen sendet man in die Hauptleitungen und zwar hat man bei einphasigem Wechselstrom zwei Hauptleitungen, bei Drehstrom aber drei Leitungen anzuwenden. Diese dritte Leitung scheint dem Drehstrom als Mangel gegenüber dem reinen Wechselstrom anzuhaften. Indessen ist das nicht der Fall. Die drei Leitungen für Drehstrom brauchen nämlich bei gleicher zu übertragender Energie nicht dicker zu sein, als die zwei für Wechselstrom. Das für die Leitung benötigte Kupfergewicht ist also das gleiche. Es ist nur die dritte Leitungsführung, welche bei der Drehstromleitung verteuernd wirkt, ein Nachteil, der aber durch die sonstigen Vorzüge des Drehstroms weit überwogen wird. Man verwendet für die Hauptleitungen Ströme von 1000 bis 5000, ja auch bis 10 000 Volt Spannung, in Ausnahmefällen sogar noch mehr.

Die Hauptleitungen, die den hochgespannten Strom führen, werden entweder durch die Luft geführt oder unterirdisch verlegt. In letzterem Falle werden konzentrische Kabel angewendet, bei denen die eine Leitung die andere umgibt, im ersteren Falle werden die Drähte auf Stangen durch Isolatoren befestigt. Trotz der hohen Spannungen genügt diese Isolation meistenteils. So werden die Hauptleitungen von der Zentrale aus durch alle diejenigen Bezirke hindurchgeführt, welchen Strom zugeführt werden soll. In jedem solchen Bezirk gehen nun von den Hauptleitungen Abzweigungen ab, welche zu je einem Transformator geführt werden, und zwar werden, wie gesagt, alle Transformatoren parallel geschaltet. Die Transformatoren werden bei Luftleitungen gewöhnlich in besondere Häuschen gestellt. Bei unterirdischen Leitungen werden sie in Keller gelegt. In jedem Falle werden die Transformatoren ebenso wie die Hauptleitungen so angebracht, daß sie für Unberufene nicht zugänglich sind, eben wegen der hohen Spannung des Stromes.

In dem Transformator wird nun die Energie des Stromes so transformiert, daß derselbe an den Enden der sekundären Klemmen nur niedrige

Spannung hat, gewöhnlich 100 bis 110 Volt. Der Strom, der aus den sekundären Klemmen herauskommt, ist nun derjenige, welcher zum eigentlichen Verbrauch dient, und zwar wird natürlich hierbei die bewährte Parallelschaltung angewendet. Von den Endklemmen der sekundären Leitungen gehen also zwei oder drei parallele Hauptdrähte aus, die je 110 Volt Spannungsdifferenz haben, sie führen durch den Bezirk hindurch und zwischen sie werden alle Lampen, sowohl Glühlampen als Bogenlampen, und alle Motoren und Heizapparate parallel geschaltet. Da für jeden Bezirk ein eigener Transformator vorhanden ist, so haben die Leitungen für diese starken Nutzströme nur geringe Länge und gerade daraus resultiert die wesentliche Ersparnis in den Anlagekosten bei diesem System. Bei Drehströmen mit ihren drei Leitungen werden die Lampen zwischen je zwei Leitungen eingeschaltet, während die Drehstrommotoren drei Leitungen brauchen, von denen je eine von jeder der drei Hauptleitungen abgezweigt wird.

Der eine Übelstand dieses Verteilungssystems besteht darin, daß die Transformatoren (ihre primären Wickelungen) auch vom Strom durchflossen werden müssen, selbst wenn in der sekundären Leitung gar kein Strom gebraucht wird. Da nun das Ummagnetisieren des Ringes immer Arbeit verbraucht, so muß diese Arbeit also während der ganzen 24 Stunden des Tages geleistet werden, während der Strombedarf nur an zirka 6 Stunden stattfindet. Dadurch wird ein ziemlich erheblicher Prozentsatz der elektrischen Energie nutzlos verbraucht. Ein zweiter sehr erheblicher Übelstand des Wechselstromsystems ist der, daß es keine Akkumulatoren für Wechselstrom gibt. Deswegen müssen die großen Maschinen Tag und Nacht arbeiten, obwohl der Verbrauch ja nur zu gewissen Stunden ein erheblicher ist. Bei Gleichströmen kann man durch Aufspeichern des Stromes in den Akkumulatoren die letzteren zur Stromabgabe in den Stunden geringen Bedarfs benutzen, während beim Wechselstrom und Drehstrom für die wenigen Lampen, die etwa in der Nacht brennen, die großen Maschinen dauernd im Betrieb sein müssen. In manchen Fällen hilft man diesem Übelstand ab, indem man einen Teil des Wechselstromes durch Umformen in Gleichstrom verwandelt und durch diesen eine Akkumulatorenbatterie laden läßt, die dann für die Nachtstunden die Stromlieferung übernimmt.

Trotz dieser Übelstände ist dieses Verteilungssystem, das unter anderem in Wien, in Rom, in Luzern, in Nürnberg, in Amsterdam und an vielen anderen Orten in dauerndem Betrieb ist, für große Bezirke wesentlich vorteilhafter als das Gleichstromsystem, und da die Drehstrommotoren jetzt sogar den Gleichstrommotoren den Rang abgelaufen haben, so ist das Drehstromsystem als ein mindestens gleichberechtigter, ja häufig überlegener Faktor neben die verschiedenen Gleichstromsysteme für die Verteilung elektrischer Energie getreten. Da nun diese beiden Systeme, jedes bei besonderen Verhältnissen, ihre besonderen Vorzüge besitzen, so macht dadurch die Verteilung elektrischer Energie unter den verschiedensten örtlichen Verhältnissen jetzt immer weitere Fortschritte. Insbesondere werden jetzt die Zentralen in größeren Städten mit Vorliebe nach dem Drehstromsystem mit Transformatoren eingerichtet.

10. Kapitel.

Die elektrischen Bahnen, Boote und Automobile.

Seitdem die Elektrizität einmal in die Reihe der schwere Arbeit verrichtenden Kräfte eingetreten und durch ihre leichte und rasche Fortpflanzungsfähigkeit im stande war, ihre Arbeit weit von dem Orte zu verrichten, an dem sie erzeugt wurde, seit dieser Zeit lag auch die Möglichkeit vor, die Elektrizität zur Beförderung von Eisenbahnen, Trambahnen, Wagen, Booten u. dergl. zu verwenden, und diese Einführung der Elektrizität in das Gebiet des Transportwesens hat schon jetzt bei diesem neue und bequeme Formen hervorgebracht und wird voraussichtlich noch weiter zu einer Umgestaltung und Vervollkommnung desselben führen.

Schon im Jahre 1879 hatten Siemens & Halske die erste elektrische Eisenbahn bei der Gewerbeausstellung in Berlin hergestellt. Das Prinzip der elektrischen Eisenbahnen, deren Idee zuerst von Werner Siemens ausgesprochen und ausgeführt wurde, ist folgendes: Wenn ein elektrischer Strom von außen in eine Dynamomaschine, einen Elektromotor, eingeführt wird, so kommt der Anker derselben in Rotation. Überträgt man nun die Rotation der Achse des Ankers in irgend einer Weise auf Räder, welche auf Schienen laufen können, und führt man in den Elektromotor irgendwie einen Strom ein, so müssen sich die Räder mit dem Elektromotor und einem fest mit ihnen verbundenen Wagen auf den Schienen fortbewegen, und die elektrische Eisenbahn ist fertig.

Es ist also dieses Problem der elektrischen Eisenbahn ein spezieller Fall des Problems der elektrischen Arbeitsleistung und Kraftübertragung. Ein elektrischer Strom wird irgendwo erzeugt (sei es durch eine Dynamomaschine, die irgendwo in der Nähe der Bahn steht, sei es durch Akkumulatoren oder Batterieen), er wird in den Motor des Eisenbahnwagens eingeleitet, und dadurch kommt dieser in Bewegung. Das ist also prinzipiell nichts anderes als jede andere elektrische Kraftübertragung.

Aber bei dieser speziellen Aufgabe treten besondere Schwierigkeiten auf, deren hauptsächlichste die ist: Wie soll man dem Eisenbahnwagen (dem Motor) den elektrischen Strom zuführen? Bei einer feststehenden Kraftübertragungsanlage hat man eine bestimmte Entfernung zwischen der primären Dynamomaschine und dem Elektromotor, und man kann diese daher durch festliegende Drähte verbinden. Bei einer elektrischen Eisenbahn aber bewegt sich der Motor, und sein Abstand von der primären Dynamomaschine ist kein fester, es muß also auch die Leitung für den Strom veränderliche Länge haben. In der Tat ist dies die schwierigste Frage bei dem elektrischen Eisenbahnbetrieb.

Der nächste Gedanke ist natürlich der, daß man die Schienen selbst zur Leitung des Stromes benutzt, und dies wurde auch von

Siemens & Halske bei der obenerwähnten ersten elektrischen Eisenbahn getan.

Bei dieser enthielt jeder elektrische Eisenbahn- oder Trambahnwagen in seinem Unterteil den Elektromotor, dessen Achse mit den Rädern des Wagens so verbunden war, daß er seine Bewegung durch Zahnräder auf die Räder des Wagens übertrug. In den Motor wurde ein Strom eingeführt, der von der primären Dynamomaschine kam. Diese selbst stand fest in der Nähe der Bahn neben einer großen Dampfmaschine, von der sie ihre Rotation erhielt. Der Strom von der primären Maschine wurde durch die Schienen dem Elektromotor, der sekundären Maschine, zugeführt, und zwar waren drei Schienen vorhanden. Auf den beiden äußeren bewegten sich die Räder, die mittlere diente allein für die Zuführung des Stromes. Von dieser wurde der Strom durch Rollen in die Dynamomaschine eingeführt und ging dann, nachdem er die Drähte des Ankers und der Elektromagnete durchlaufen hatte, durch die Wagenräder zu den äußeren Schienen und durch diese zur primären Maschine zurück.

Doch zeigte es sich bald, daß es nur in speziellen Fällen möglich ist, die Schienen zur Stromleitung zu benutzen. Bei feuchtem Wetter nämlich und auch wenn Schnee zwischen den Schienen liegt, sind die mittlere und die äußeren Schienen leitend verbunden, und es wird dadurch der Strom, der durch die Leitung geht, zu sehr geschwächt. Deshalb begann man bald nach anderen Mitteln zu suchen, um den Strom in einen Wagen sicher und ohne Verlust einzuführen.

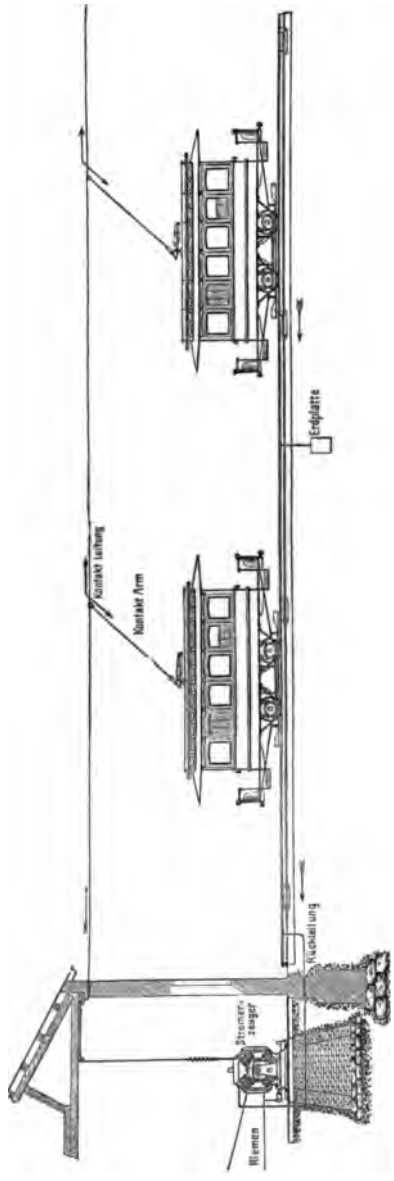
Im Laufe der Entwickelung der elektrischen Eisenbahn wurden nun verschiedene Methoden für die Zuleitung der Elektrizität gefunden, und zwar sind es bisher drei verschiedene Systeme, durch die man elektrische Eisenbahnen betreibt, nämlich das System der oberirdischen Zuführung des Stromes, das System der unterirdischen Zuführung und endlich das System ohne Zuführung des Stromes aus der Ferne, nämlich das System der Akkumulatorbahnen.

Die oberirdische Stromzuführung wurde schon von Siemens & Halske bei einer ihrer ersten Anlagen, nachdem sich die Schienenleitung als unzweckmäßig erwiesen hatte, eingeführt, wurde aber dann namentlich in Amerika, wo das elektrische Straßenbahnsystem zuerst die meisten Fortschritte gemacht hatte, weiter ausgebildet und ist von dort wieder nach Europa übergegangen. In der Mehrzahl aller Fälle ist es dieses System, welches bei Trambahnen und Eisenbahnen jetzt angewendet wird. Bei diesem System wird über den Schienen ein besonderer blanker Draht ausgespannt, durch welchen der Strom von der Maschine fließt. Diesen Draht, Arbeitsleiter oder Trolleydraht genannt, berührt nun ein mit dem Wagen verbundener Arm fortdauernd und leitet dadurch den Strom in den Wagen, also in den im Wagenuntergestell befindlichen Elektromotor. Von diesem aus geht der Strom dann durch die Schienen wieder zur Dynamomaschine zurück, womit der Stromkreis geschlossen ist. Laufen auf einer Bahn, wie gewöhnlich, mehrere Wagen zu gleicher Zeit, so sind diese infolgedessen alle parallel geschaltet, wie man aus Fig. 502 erkennt. Links steht die primäre Dynamomaschine; die beiden Hauptleitungen, die von dieser ausgehen, sind: oben der Ar-

beitsleiter, unten die Schienen, und zwischen beiden sind alle Wagenmotoren nebeneinander geschaltet.

Es befindet sich also bei diesem System auf der Decke jedes Wagens ein Arm, gewöhnlich aus Stahlrohr gefertigt, welcher oben eine Kontaktrolle trägt, die längs dem Arbeitsleiter rollt und von diesem den Strom abnimmt. Der Arm ist nun mit starken Federn unten versehen, so daß die Rolle immer an den Arbeitsdraht herangedrückt wird, auch wenn dieser zwischen zwei Befestigungspunkten durchhängt, also nicht überall dieselbe Höhe über den Schienen hat, oder wenn er, wie bei Viadukten, besonders niedrig gespannt ist. Der federnde Arm muß immer die Kontaktrolle an den Leiter anpressen. Man bezeichnet dieses System des Arbeitsleiters mit einer Kontaktrolle als das Trolleysystem.

Fig. 502.

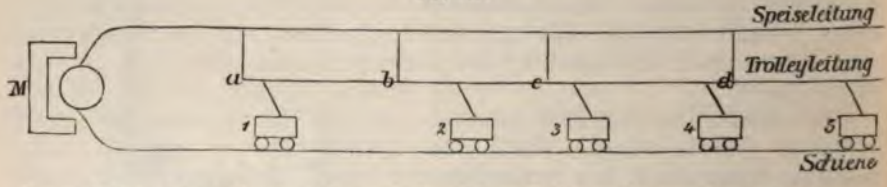


So einfach aber läßt sich das Trolleysystem nur in wenigen Fällen verwenden. Wenn durch den Arbeitsleiter fortlaufend und ununterbrochen der Strom gesendet wird, so können beim wirklichen Betrieb Schwierigkeiten entstehen. Es kann z. B. durch einen Brand notwendig sein, eine Rettungsleiter aufzustellen, den Draht durchschneiden und entfernen zu müssen, oder es kann der Draht verletzt werden und reißen. Dadurch müßte der Betrieb so lange auf der ganzen Strecke eingestellt werden, bis das Hindernis sachgemäß beseitigt ist. Um solche Störungen zu beschränken, wird der Arbeitsdraht in einzelne Strecken von 200—500 m Länge, je nach der Straßenlage, geteilt, und an diesen Teilungsstellen wird in den Arbeitsleiter selbst ein isolierendes Stück eingesetzt. Die elektrische Verbindung aber zwischen den an dieser Stelle zusammentreffenden Leitungsdrähten wird dadurch hervorgebracht, daß von dem Endpunkt des einen und dem Anfangspunkt des nächsten Stückes je ein Draht zu einem Ausschalter (S. 418), der gewöhnlich in einem verschlossenen Kasten in einem nahe befindlichen Hause angebracht ist, geführt wird. Dadurch ist der elektrische Zusammenhang

des ganzen Drahtes gewahrt, aber man kann nun eine solche Strecke einfach stromlos machen, indem man die Ausschalter öffnet. Aber damit ist noch nicht alles erreicht. Denn offenbar findet in solchem Falle immer noch eine vollständige Unterbrechung des Stromes, also auch des Verkehrs in demjenigen Teile der Leitung statt, der hinter der ausgeschalteten Strecke liegt, von der Maschinenstation aus gerechnet. Der Strom geht eben dann von der Maschinenstation durch den Trolleydraht bis zu dem geöffneten Ausschalter und durch die auf dieser Strecke befindlichen Wagen zur Erde. Aber die hinter dem geöffneten Ausschalter befindlichen Wagen erhalten keinen Strom.

Das Interesse des Verkehrs verlangt aber, daß in solchen Fällen eben nur auf einer kleinen Strecke der Betrieb unterbrochen wird, während er sonst überall aufrecht erhalten werden soll. Diese Forderung wird nun auf folgende Weise erfüllt. Von der primären Maschine aus wird eine Hauptstromleitung (Speiseleitung) gelegt, welche nur dazu dient, den Strom weiter zu führen, welche aber nicht von einem

Fig. 503.



beweglichen Kontakt berührt wird. Diese Leitung kann oberirdisch oder unterirdisch, beliebig nah oder weit von den Schienen geführt werden, sie kann auch zum Teil oberirdisch, zum Teil unterirdisch gelegt sein. Dagegen wird der eigentliche Kontaktleiter (Trolleyleiter) über den Schienen geführt, und dieser wird in gewissen Abständen, alle 100 bis 200 m, durch Querdrähte mit dem Speiseleiter verbunden.

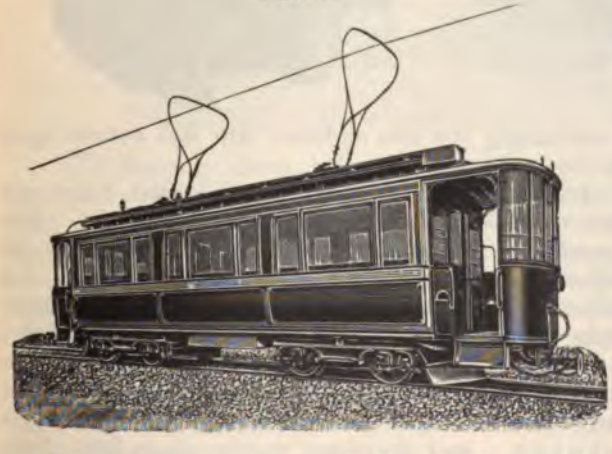
Diese Stromführung ist schematisch in Fig. 509 dargestellt. In dieser zeigt M die primäre Dynamomaschine an, deren Bürsten einerseits mit der unterirdisch oder oberirdisch gelegten Speiseleitung, andererseits mit den Schienen verbunden sind. Über den Schienen ist die Trolleyleitung ausgespannt; sie ist an verschiedenen Punkten a, b, c, d mit der Speiseleitung verbunden, aber von den Schienen ist sie isoliert. Solange kein Wagen fährt, fließt auch kein Strom durch die Trolleyleitung. Fahren nun die Wagen 1, 2, 3, 4, 5, so bildet jeder durch Vermittelung des Trolleyleiters eine Verbindung zwischen Schienen und Speiseleitung und jeder erhält, da sie alle parallel geschaltet sind, seinen Teil des ganzen Stromes. Durch diese Einrichtung ist erstens jede Störung in einem Arbeitsleiter nur auf die Strecke von 100 bis 200 m beschränkt. Wenn der Trolleyleiter an einer Stelle bricht oder entfernt werden muß, so geht der Strom trotzdem durch die Speiseleitung und wird den anderen Sektionen des Trolleyleiters zugeführt, so daß also die einzelnen Wagen doch ihren Strom bekommen. Ferner kann die Speiseleitung zum Schutz gegen alle Beschädigungen sehr hoch oder unterirdisch angebracht werden. Drittens braucht bei diesem System der Trolleyleiter nur so dick zu sein, wie er zur sicheren Führung der Rolle notwendig ist. Er braucht nicht,

wenn sehr starke Ströme (bei vielen gleichzeitig fahrenden Wagen) notwendig sind, so stark zu sein, daß er diese Ströme ohne großen Verlust aufnehmen kann. Denn der Hauptstrom geht durch die Speiseleitung, und jede Sektion des Trolleyleiters wird nur von Zweigströmen durchflossen.

Fig. 504.

Der Trolleyleiter wird gewöhnlich an Drahtseilen aufgehängt, die entweder über die Straße gespannt werden und an den Häusern befestigt sind, oder die an besonderen Masten, welche neben den Schienen stehen, angebracht sind. Die Leitungsführung läßt sich dabei auch so einrichten, daß sie für das Auge gefällig ist. Bei Kurven und Weichen muß man natürlich sorgfältig den Trolleyleiter so spannen, daß er eine sichere Führung für die Rolle gibt, damit diese nicht herausspringt. Fig. 504 zeigt einen solchen elektrischen Trambahnwagen der Stadtbahn in Halle. Man sieht die Stange mit der Kontaktvorrichtung, welche von der Wagendecke aus sich gegen den Trolleyleiter drückt.

Fig. 505.



Die Rolle kann natürlich zuweilen von dem Trolleyleiter abspringen. Dann ist die Stromzufuhr zu dem betreffenden Wagen unterbrochen. Wenn der Wagen im Gefälle geht, so kann er dadurch, wenn man ihn nicht sofort bremst, ins Laufen kommen und Unglück anrichten. Deswegen wird in vielen Fällen statt der Gleitrolle

ein Gleitbügel angewendet, bei dem ein solches Abspringen nicht vorkommen kann. Der Gleitbügel, von denen zwei an dem Wagen Fig. 505 angebracht sind, ist wie die Rolle an einem beweglichen Arm befestigt und wird von unten gegen den Trolleydraht gedrückt. Die Länge der Kontaktfläche des Bügels verhindert im Gegensatz zu der kleinen Kontaktfläche der Rolle das Abspringen vollständig. Außerdem brauchen die Kurven in der Trolleyleitung nicht so eng sich den Schienenkurven anzuschließen, so daß die Führung des Trolleydrahtes einfacher wird.

Da die Schienen immer die Rückleitung des Stromes zur Station übernehmen müssen, so muß man dafür sorgen, daß sie in gutem Kontakt miteinander stehen. An den Stößen werden daher zwei Schienen bei elektrischen Bahnen gewöhnlich durch angelötete Kupferbleche metallisch miteinander verbunden.

Fig. 506.

Die Spannungsdifferenz der Hin- und Rückleitung wird gewöhnlich zu 500 Volt gemacht und wird immer konstant erhalten. Da die einzelnen Trambahnwagen zwischen diesen beiden Leitungen parallel geschaltet sind, so genügt das Konstanterhalten der Spannung, um

Fig. 507.

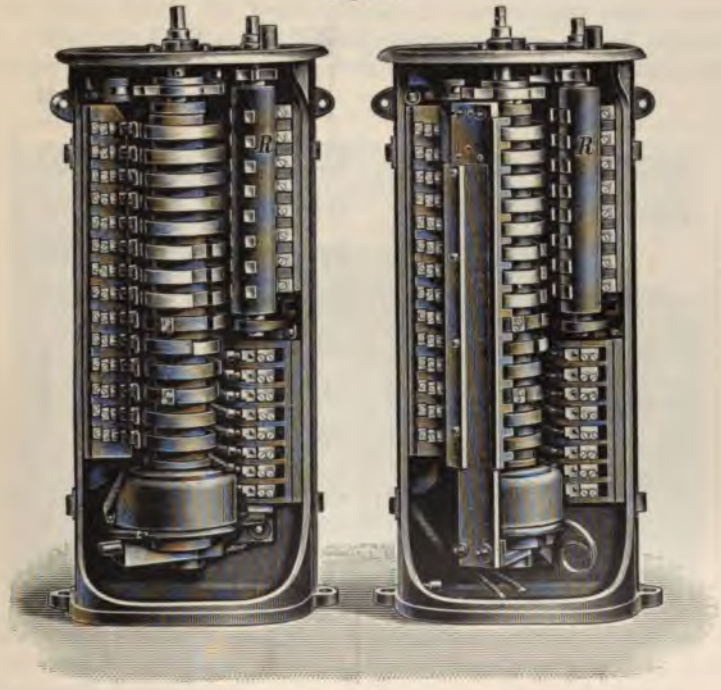
einem jeden Motor, unabhängig von den anderen, den ihm notwendigen Strom zu verschaffen.

Ein vollbesetzter Trambahnwagen braucht pro Kilometer Fahrt auf ebener Bahn ungefähr 400 Wattstunden zugeführter Energie. Der Energiebedarf, also auch der Strombedarf eines Trambahnwagens, ist aber nicht immer derselbe, sondern variiert sehr. Beim Angehen des Wagens von der Ruhe aus ist er etwa 5- bis 10mal so groß als beim Laufe auf horizontaler Strecke, bei Steigungen wird er natürlich größer, beim Herunterfahren auf geneigter Bahn geringer. Die Motoren für den Trambahnbetrieb müssen daher mit großer Zugkraft von der Ruhe aus angehen. Das leisten, wie wir S. 496 gesehen haben, am besten die Hauptstrommotoren, und deswegen werden diese fast allein bei Trambahnen angewendet. Dabei muß ein solcher Motor, da er unten am Wagengestell angebracht ist, ziemlich niedrig sein, und er muß außer-

dem, da er dem Straßenschmutz ausgesetzt ist, vollständig eingekapselt sein. Die Motoren werden daher für diese Zwecke so gebaut, daß das Magnetsystem einen vollständigen gußeisernen Kasten um den Anker herum bildet, der aber leicht geöffnet werden kann. Um die zu große Erwärmung der Motoren durch die Einkapselung zu vermeiden, wendet man häufig die ventilierte Kapselung an, bei der durch zwei Öffnungen in der Kapselung ein Ventilator die kalte Luft von außen ansaugt und die erwärmte nach außen hinaustreibt.

In Fig. 506 und 507 ist ein solcher Straßenbahnmotor der A.E.G. mit aufgeklapptem Gehäuse und in geschlossenem Zustand dargestellt.

Fig. 508.



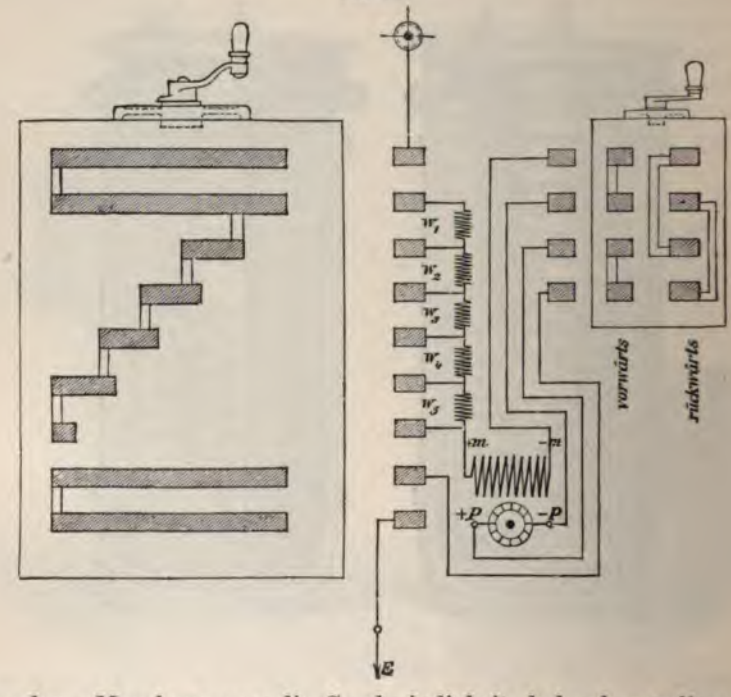
Die Motoren, deren Anker in Zahnräder auslaufen, treiben vermittels Zahnradübersetzung die Räder des Trambahnwagens. Die Geschwindigkeit des Motors ist gewöhnlich eine viel höhere, als die Wagenräder sie haben dürfen, und deswegen muß die Übersetzung eintreten.

Die Motoren sind an dem Untergestell der Trambahnwagen federnd befestigt und zwar ist für jede Wagenachse ein Motor vorhanden. Jeder Anker dreht zunächst ein kleines Zahnrad und dieses greift in ein größeres ein, welches nun die Wagenräder bewegt. Die Zahnräder laufen in Öl, um sich wenig abzunutzen und um das Geräusch zu vermindern. Auf dem Untergestell ist der eigentliche Waggon selbst auch wieder federnd befestigt.

Um die Geschwindigkeit des Wagens regulieren zu können und um den Wagen nach Bedarf vorwärts oder rückwärts fahren zu lassen, ist

am Platze des Wagenführers ein Regulierapparat, Kontroller oder Fahrschalter genannt, angebracht. Auf einer zylindrischen Walze, die von dem Wagenführer durch eine Kurbel gedreht wird, sind übereinander eine Reihe von Kontaktstücken angebracht, auf welchen Federn schleifen können. Jedes Federpaar ist mit einem der Systemteile verbunden, welche nun durch den Kontroller in verschiedener Weise zusammengeschaltet werden sollen. Man sieht in Fig. 508 einen Kontroller für Straßenbahnzwecke der Siemens-Schuckertwerke, geöffnet in zwei Stellungen. Die Kontaktstücke werden mit den Ankerdrähten, mit den Drähten der Magnetbewickelungen und mit Rheostatenwiderständen

Fig. 509.

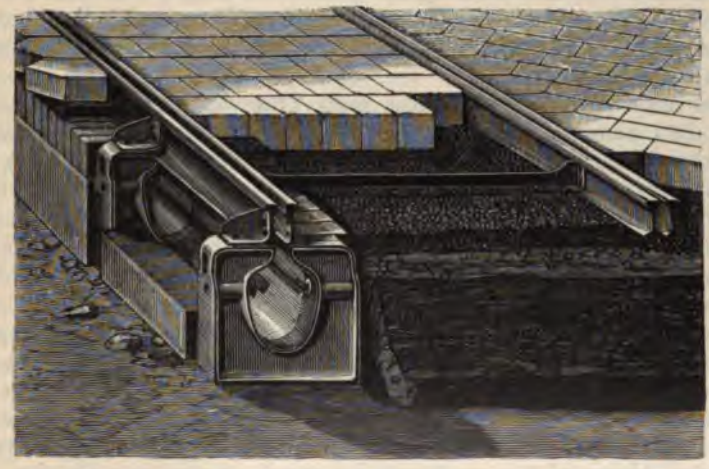


verbunden. Man kann nun die Geschwindigkeit dadurch regulieren, daß Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet werden, oder dadurch, daß die Magnetbewickelung aus mehreren Teilen besteht, die parallel oder hintereinander geschaltet werden. Um den Motor rückwärts laufen zu lassen, muß man die Stromrichtung im Anker oder in den Magneten umkehren, nicht in beiden zugleich. Zu dem Zwecke ist in dem Kontroller noch eine zweite Walze, die Reversierwalze, angebracht, die nur bei Stromumkehrung benutzt wird. In Fig. 508 sieht man sie auf der rechten Seite bei R. Ein einfaches Schema der Verbindungen bei dem Schuckertschen Kontroller mit Umkehrwalze zeigt Fig. 509. Links ist die Walze für die Änderungen der Geschwindigkeit, rechts die für die Umkehrung. Der Strom kommt von oben in den Hebel herein. Bei der ersten Stellung sind alle Widerstände w_1 bis w_5 vor den Motor

geschaltet, der aus der Magnetwickelung m m und dem Anker P P besteht. Man sieht, wie durch Weiterdrehen der Kurbel links die Widerstände allmählich ausgeschaltet werden, der Wagen also immer schneller läuft. Wenn bei der Umkehrwalze der Hebel nach links steht, läuft der Motor vorwärts, wird er nach rechts gestellt, so ist der Strom im Anker umgekehrt und er läuft zurück. Da bei der Ein- und Ausschaltung der starken Ströme an den Kontaktstücken des Kontrollers leicht Funken und Lichtbogen entstehen, so muß man dafür sorgen, daß diese Funken rasch ausgelöscht werden. Doch soll diese spezielle Einrichtung hier nicht weiter erörtert werden.

Die oberirdische Stromzuführung, wie sie bei diesen Bahnen gebraucht wird, ist zwar durch die beschriebenen Einrichtungen recht sicher gemacht. Aber die Drähte, die über die Straßen dabei laufen müssen, und namentlich die vielen Querdrähte, welche den Trolleydraht tragen, machen

Fig. 510.



im allgemeinen keinen sehr erfreulichen Eindruck und in manchen Fällen wird, um das Straßenbild nicht zu beeinträchtigen, von den Behörden ihre Anbringung untersagt.

Bei der unterirdischen Stromzuführung ist nun eine solche Veränderung des Straßenanblicks ganz vermieden, allerdings auf Kosten einer erheblichen Verteuerung der Anlage. Ein solches Trambahnsystem ist von Siemens & Halske in Budapest und zum Teil in Berlin und Wien eingerichtet worden. Bei dieser Anlage befindet sich unter der einen Schiene fortlaufend ein Kanal, wie aus Fig. 510 ersichtlich ist, dessen oberen Abschluß eben die eine Schiene bildet. Dieselbe besitzt in der Mitte eine Rille von 33 mm Weite, durch welche der Kanal für einen von dem Wagen herabreichenden Kontaktarm zugänglich ist. In dem Kanal sind nun zwei nackte Leitungen aus dickem Winkeleisen angebracht, die also unterhalb der einen Schiene laufen. Zwischen diesen bewegt sich der Kontaktarm, bestehend aus einer gut isolierten Platte, die an ihrem unteren Ende zwei drehbare Metallzungen trägt. Diese be-

rühren die beiden Leitungen und führen so den Strom von der einen Leitung nach oben in den Motor des Trambahnwagens und von diesem zur anderen Leitung zurück. Die beiden Leitungen haben eine Spannungsdifferenz von 300 bis 600 Volt. Es ist ersichtlich, daß dieses System von elektrischen Trambahnen sich dem Äußeren nach gar nicht von den gewöhnlichen Trambahnen unterscheidet, nur daß eben die Pferde nicht vorhanden sind. Die Anlagekosten sind dagegen natürlich viel höhere, weil der Kanal unterhalb des Straßenniveaus geführt werden muß. Besondere Vorrichtungen müssen dabei getroffen werden, um den Kanal von Wasser und Schnee und Schmutz zu befreien. Trotzdem sind die bisherigen Anlagen, die allerdings sehr rentable Linien umfassen, durchaus erfolgreiche. Für andere Verhältnisse aber wäre dieses System wohl meistens zu kostspielig. In manchen Fällen wird das System der Oberleitung mit dem der unterirdischen Zuleitung verbunden, indem nur in den eleganten Stadtteilen unterirdische Zuführung herrscht. Dann müssen die Wagen sowohl mit Gleitbügel wie mit dem Kontaktarm für die unterirdische Leitung versehen sein und an den Übergangsstellen von dem einen zum anderen System muß die Umwechselung der Kontaktmittel stattfinden.

Auf eine dritte Weise kann man Tramways elektrisch betreiben, indem man nämlich den Elektromotor durch Akkumulatoren speist und die Akkumulatoren mit dem Wagen fahren läßt. Bei diesen Akkumulatorbahnen braucht man offenbar gar keine besondere Stromleitung. Jeder Wagen hat seine Kraftquelle bei sich, ganz wie ein bisheriger Trambahnwagen, nur daß bisher die Kraftquelle, nämlich die Pferde, vor dem Wagen, dort aber, die Akkumulatoren, in dem Wagen sich befinden.

In dieser Weise sind die Tramways in einigen Städten so umgewandelt worden, daß statt des Pferdebetriebs ein elektrischer Betrieb eingerichtet wurde. Der vorher geladene Akkumulator treibt, indem er selbst in dem Tramwaywagen sich befindet, die Dynamomaschine, welche ihrerseits die Räder des Wagens in Bewegung setzt. Nach einigen Stunden, wenn der Akkumulator erschöpft ist, wird er an einer Station durch einen neuen ersetzt. Da die Akkumulatoren dabei Stößen und Erschütterungen ausgesetzt sind, so müssen sie geschlossen sein, damit die Säure nicht verschüttet wird.

Die Bleiakkumulatoren in der Form, wie sie bisher zu stationären Anlagen verwendet wurden, eignen sich aber zunächst nur sehr wenig für den elektrischen Tramwaybetrieb. Erstens sind sie viel zu schwer und zweitens ist ihnen die starke Stromentnahme, die beim Anfahren eines Wagens, bei Steigungen und Kurven stets stattfinden muß, gefährlich. Die Akkumulatorbahnen haben deswegen mit großen Schwierigkeiten zu kämpfen, um auch nur mit den anderen elektrischen Bahnen konkurrieren zu können. Die Bestrebungen der Akkumulatorenfabriken, die auf Herstellung von brauchbaren Trambahnakkumulatoren seit Jahren gerichtet waren, haben Erfolge bisher insofern gehabt, als es gelungen ist, Batterieen von viel geringerer Empfindlichkeit gegen Ladung und Entladung mit zu hoher Stromstärke zu konstruieren. So kann man jetzt bereits die Ladung, die ein Trambahnakkumulator für eine Stunde Arbeit

braucht, ihm in einer Viertelstunde zuführen. Trotzdem ist das reine Akkumulatorensystem für die meisten Fälle ein viel zu teueres und es kann mit den beiden anderen Systemen nicht konkurrieren.

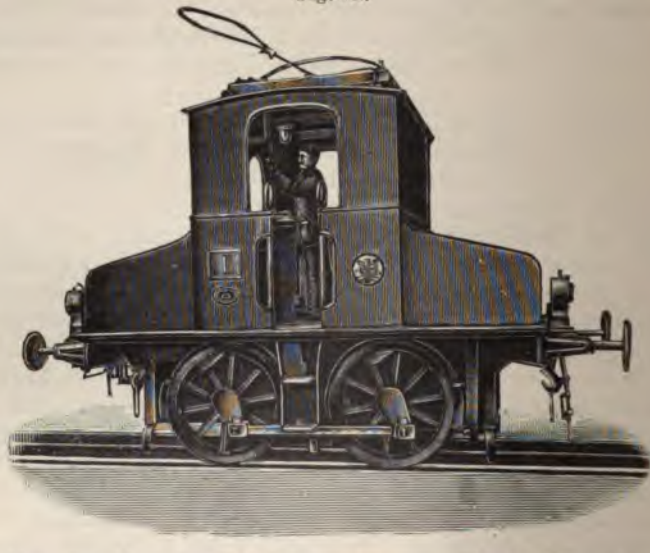
Da sich manche Städte gegen das Oberleitungssystem sträuben, weil die über die Straßen gespannten Drähte die Schönheit, namentlich der eleganten Straßen, beeinträchtigen, so ist man in manchen Orten zu einem gemischten System übergegangen, welches die Akkumulatorbahn mit der Oberleitungsbahn verbindet. Es werden nämlich dabei in den äußeren Stadtteilen, die die Wagen zu durchfahren haben, die oberirdischen Drähte wie gewöhnlich gespannt, und der Strom wird von ihnen durch einen Kontaktarm in den Wagen geleitet. Im Wagen befindet sich aber selbst eine Akkumulatorenbatterie, welche parallel zum Motor geschaltet ist, also bei dieser Fahrt durch die äußeren Stadtteile selbst mit geladen wird. In der inneren Stadt dagegen oder in besonders vornehmen Straßen fehlt die Oberleitung und die vorher geladene Batterie treibt nun den Motor. Es kann natürlich dabei die Batterie, da sie nur auf kürzere Strecken Strom abzugeben hat, kleiner gewählt werden, und außerdem nimmt das Laden, da es während der Fahrt geschieht, keinen Aufenthalt in Anspruch. Der Kontaktarm wird beim Übergang von den äußeren Straßen zu den nicht mit Oberleitung versehenen einfach auf die Wagendecke umgelegt. In anderen Fällen, z. B. in München, werden in den Straßen, die keine Oberleitung erhalten sollen, die Trambahnwagen durch besondere Akkumulatorenlokomotiven gezogen.

Die elektrischen Trambahnen empfehlen sich vor allem durch die Tatsache, daß der Maschinenbetrieb bedeutend billiger ist als der Pferdebetrieb. Ferner dadurch, daß bei elektrisch betriebenen Bahnen auch zeitweilig weit größere Kräfte leicht zur Entwickelung kommen können als bei Pferdebahnen. Bei starken Steigungen z. B., bei denen man sonst Vorspannpferde benutzen muß, braucht der elektrische Motor nur bei stärkerem Strom, d. h. ohne eingeschaltete Widerstände zu laufen, um diese Kraft zu entwickeln. Die elektrischen Wagen können auch, wo es erlaubt ist, weit schneller fahren als die von Pferden gezogenen. Ferner kann ein elektrischer Wagen wegen des Fortfalls der Pferde größer gemacht werden als ein anderer Wagen, ohne die Straßen mehr zu sperren, und endlich kann man bei elektrischem Betrieb, wenn Andrang vorhanden ist, dem elektrischen (Motor-) Wagen andere Wagen anhängen oder man kann auch leicht viel mehr Wagen laufen lassen als bei normalem Betrieb, falls nur die primäre Dynamomaschine von vornherein groß genug gewählt ist. Dies sind Vorzüge, welche der weiteren Einführung des elektrischen Trambahnbetriebes zu Hilfe kommen. In der Tat hat sich auch überall, wo elektrische Trambahnen eingeführt sind, eine ganz außerordentliche Zunahme des Verkehrs gezeigt und, was für die Direktion die Hauptsache ist, neben der beträchtlichen Erhöhung der Einnahmen pro Wagenkilometer ergab sich ausnahmslos eine beträchtliche Verminderung der Ausgaben. Daher wird der Pferdebetrieb in nicht zu langer Zeit gänzlich und überall durch den elektrischen Betrieb der Trambahnen verdrängt sein. In manchen Orten, in denen wegen der schwierigen Terrainverhältnisse eine Pferdebahn überhaupt nicht

möglich war, weil sie unrentabel gewesen wäre, ist man sogar direkt zum elektrischen Trambahnbetrieb, ohne den sonstigen Umweg, gekommen, ebenso wie ja auch in vielen kleineren Orten sich die elektrische Straßenbeleuchtung zweckmäßig einführen ließ, ohne daß diese vorher Gasbeleuchtung gehabt hätten.

Der elektrische Betrieb beginnt nun auch vielfach für kleine Nebenbahnen, für landwirtschaftliche Bahnen und insbesondere für Bahnen in Bergwerken sich einzuführen. Die Führung der elektrischen Oberleitung erhöht zwar die Kosten der Geleiseanlage gegenüber den gewöhnlichen Bahnen. Aber man braucht zur Erzeugung der Kraft nur eine einzige große Dampfmaschine stationär aufzustellen, welche viel weniger Kohlen pro Pferdekraft verbraucht als eine Lokomotive, und man erspart die sehr teuren Dampflokomotiven, indem man die viel billigeren elektrischen Lokomotiven benutzt. Außerdem kann das Geleise einfacher gebaut werden, weil die schweren Lokomotiven fortfallen. Solche elektrische Lokomotiven werden in verschiedenen Formen gebaut. Sie eignen sich wegen ihrer dauernden Betriebsbereitschaft für manche Zwecke, z. B. für Beförderung von Gütern auf Anschlußgeleisen von den Fabriken nach den Stationen und umgekehrt, ferner auch im Eisenbahn

Fig. 511.



dienst selbst für das Rangieren von Zügen. Die Lokomotiven werden zuweilen als Akkumulatorlokomotiven eingerichtet, meistens aber auch für Oberleitungsbetrieb. Fig. 511 zeigt eine solche Lokomotive der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft für den Rangierdienst in Gleiwitz. Die Lokomotive enthält nur den Elektromotor mit dem Kontroller und den nötigen Schalthebeln und Sicherungen. Für Grubenbahnen werden diese Lokomotiven natürlich viel niedriger eingerichtet.

Ebenso wie im Stadtverkehr und für Kleinbahnen bieten aber die elektrischen Bahnen auch für den Fernverkehr gewisse Vorteile.

Für große Entfernungen eignet sich aber nur der hochgespannte Wechselstrom und Drehstrom und es werden also Drehstrombahnen wie schon an einigen Orten, so allmählich noch mehr entstehen. Der Drehstrom hat immerhin den Nachteil vor dem einphasigen Wechselstrom, daß er drei Leitungen braucht. Für Fernleitungen bedeutet die dritte Leitung eine nicht unbedeutende Erhöhung der Anlagekosten. Außerdem machen die drei Leitungen in Bahnhöfen, bei Schienenkreuzungen und Weichen die Anlage unübersichtlich. Da man jedoch bisher einphasige Wechselstrommotoren nicht von derjenigen Vollendung bauen konnte, wie Drehstrommotoren, so nahm man den Nachteil der dritten Leitung mit in den Kauf. Die Motoren müssen beim Eisenbahnbetrieb mit voller Last angehen können und müssen in ihrer Tourenzahl und ihrer Drehungsrichtung einfach reguliert werden können. Man hofft durch den einphasigen Kollektormotor (S. 505 f.) einen derartigen Motor erlangt zu haben, welcher allen Anforderungen genügt. In der Tat werden nun auch in Deutschland Versuche gemacht, um Vollbahnen auf diese Weise elektrisch zu betreiben, und wenn diese Versuche, wie zu hoffen, günstige Resultate ergeben, so wird der einphasige Wechselstrom von hoher Spannung berufen sein, die Dampfeisenbahnen allmählich zu depossedieren.

Bei derartigen elektrischen Vollbahnen, wie sie jetzt zum Teil ausgeführt, zum Teil geplant sind, ist ein wesentlicher Unterschied im Betrieb gegenüber den Dampfbahnen nicht vorhanden. Lange Züge mit elektrischen Lokomotiven ersetzen die langen Züge mit Dampflokomotiven.

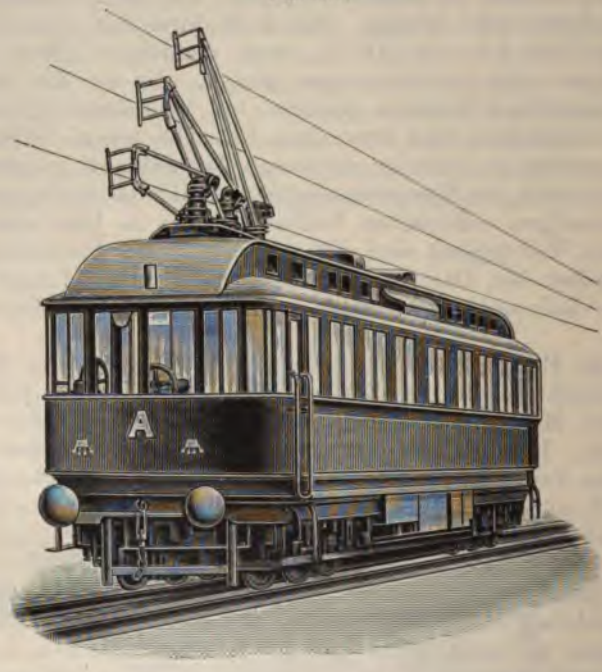
Aber die Elektrizität erlaubt auch einen ganz anderen Betrieb von großen Fernbahnen. Da nämlich bei elektrischen Bahnen jeder einzelne Wagen einen Motor besitzen kann, so eignen sie sich ganz besonders zum Einzelbetrieb. Rasch aufeinander folgende einzelne Wagen, jeder mit einer beschränkten Zahl von Personen, wie sie gerade bei Straßenbahnen eingeführt sind, und die mit großer Geschwindigkeit laufen, werden allmählich auch für größere Entfernungen eingeführt werden. Vor einigen Jahren hat sich in Berlin eine Gesellschaft für elektrische Schnellbahnen gebildet, welche sich die Aufgabe gestellt hat, die Einrichtungen eines solchen Fernverkehrs praktisch durchzuarbeiten und welche sich das Ziel steckte, elektrische Bahnen zu bauen, welche mit 200 Kilometer per Stunde Geschwindigkeit befahren werden. Dieses Ziel hat sie im Jahre 1903 in glänzender Weise erreicht. Sie hatte zwei Schnellbahnwagen, von denen der eine von Siemens & Halske, der andere von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gebaut war, und beide lösten tadellos die Aufgabe, mit einer Geschwindigkeit von über 200 Kilometern pro Stunde zu fahren.

Der Strom wurde bei diesen Fahrten, welche zwischen Zossen und Lichterfelde stattfanden, auf drei Fahrdrähten dem Wagen zugeführt und zwar war es Drehstrom mit 10 000 bis 15 000 Volt Spannung. Fig. 512 zeigt den Schnellbahnwagen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Durch je drei kurze Kontaktstücke wurde der Strom von den Fahrdrähten abgenommen und in das Innere des Wagens geleitet. Die Stromabnehmer mußten natürlich besonders konstruiert sein, um trotz der großen Geschwindigkeit immer sicheren Kontakt zu machen. Die Kontaktarme nehmen, wie man sieht, den Strom nicht von oben, sondern

von der Seite ab. Der hochgespannte Strom wird im Innern des Wagens durch zwei parallel geschaltete Transformatoren in niedrig gespannten verwandelt und dieser geht in die Drehstrommotoren ein, natürlich durch Anlasser, Schaltapparate und Sicherungen hindurch. Jeder von den beiden Motoren konnte zwischen 250 und 750 Pferdekräfte leisten. Die besonderen Einrichtungen, wie die Motoren an dem Wagengestelle befestigt und wie sie mit den Rädern des Wagens verbunden waren, ferner die Schaltungen, Meßapparate u. s. w. können hier nicht eingehend behandelt werden.

Durch das Gelingen dieser kühnen und großartigen Versuche haben

Fig. 512.



die beiden Gesellschaften, Siemens & Halske und Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, der Elektrotechnik ganz neue und weitreichende Aussichten eröffnet. So wie die großen Kraftübertragungsversuche bei der Frankfurter Ausstellung (S. 519 f.) die Möglichkeit der Kraftübertragung auf große Entfernungen zuerst gezeigt haben und damit unzählige Anwendungen, die im Laufe der Jahre sich ergaben, vorbereitet haben, so werden auch diese Schnellbahnversuche vermutlich eine Umwälzung unseres ganzen Fernverkehrs allmählich hervorbringen. Wo die pekuniären Mittel zur Einrichtung eines solchen Schnellverkehrs vorhanden sind, da kann die Elektrotechnik jetzt mit Sicherheit die Ausführung übernehmen. Die Unternehmungslust des Kapitals wird hoffentlich auch hier die bureaukratische Ängstlichkeit besiegen, und dadurch dem menschlichen Verkehr einen neuen großartigen Aufschwung geben.

Die Elektrizität unterscheidet sich eben in ihren Wirkungen von der Dampfkraft so wesentlich, daß auch der Transport von Massen auf elektrischem Wege anders eingerichtet werden kann als der mit Dampfkraft. Die Dampfeisenbahn benutzt vorteilhaft eine sehr starke Lokomotive, an welche eine sehr große Last in vielen Waggons angehängt wird. Wollte man jeden einzelnen Waggon mit einer kleinen Lokomotive versehen, so würde das ein sehr unpraktisches Beginnen sein. Die Elektrizität dagegen läßt sich ohne erhebliche Verluste in eine ganze Anzahl kleiner Maschinen einleiten, die dann jede nur eine kleine Arbeit leisten können. Wenn also beim Dampf die Zentralisierung notwendig ist, so ist bei der Elektrizität die Teilung vorteilhaft, die Zentralisierung aber auch nicht unvorteilhaft. Daher eignet sich die Elektrizität besser als

Fig. 513.

der Dampf zum Betrieb von Trambahnen, für Bahnen in Bergwerken, für landwirtschaftliche Bahnen und wohl ebenso gut wie der Dampf zum Betrieb von großen Vollbahnen.

In manchen Fällen läßt sich dabei der elektrische Betrieb mit Zufuhr der Elektrizität auch da einrichten, wo kein Schienengeleise gelegt werden kann oder darf, oder wo die Ausführung des Geleises zu kostspielig wäre. Man hat begonnen, sogenannte geleislose elektrische Bahnen auf Landstraßen für den Personen- und namentlich Gütertransport einzurichten. Man spannt zwei Fahrdrähte seitlich oder mitten auf der Straße, der Länge nach, wie beim Trambahnbetrieb. Der Wagen, etwa ein Omnibus oder ein lokomotivartiger Karren, nimmt auch durch Gleitrollen oder Gleitbügel von den Fahrdrähten den Strom ab und führt ihn in seinen Motor. Aber die Gleitstangen sind so nach allen Richtungen drehbar und zum Verlängern eingerichtet, daß der Wagen nicht direkt unter den Fahrdrähten zu bleiben braucht, sondern nach jeder Seite um 3,5 Meter sich herausbewegen kann. Dadurch ist ein Ausweichen des Wagens auf der Landstraße möglich, während doch immer durch die Fahrdrähte ihm Strom zugeführt wird. Fig. 513 zeigt einen solchen elektrischen Omnibus der Firma Max Schiemann & Co. in Dresden, welche sich hauptsächlich mit

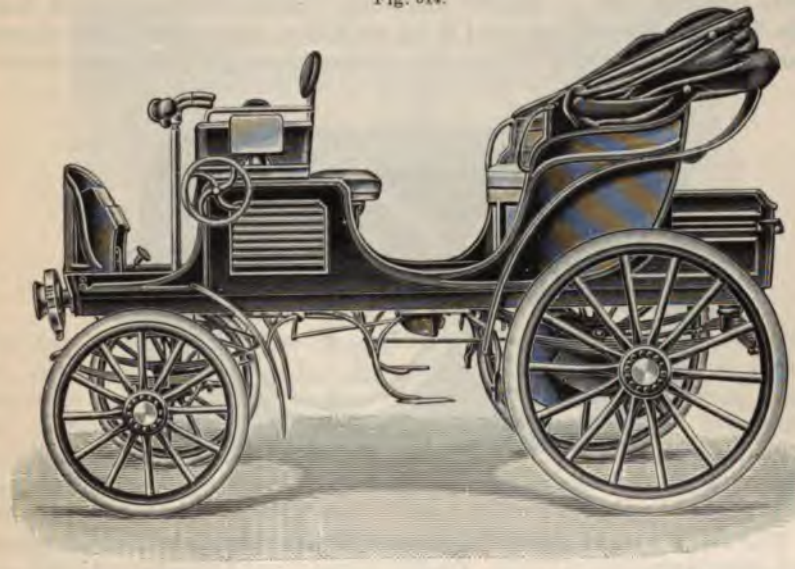
der Einführung dieses Systems beschäftigt. Der Wagen ist gerade im Umwenden begriffen. Er besitzt zwei Achsen, von denen die hintere fest ist, während die vordere vom Führerstand aus gedreht werden kann, um leichte Lenkbarkeit des Wagens zu erzielen. Die Elektromotoren, von denen gewöhnlich zwei angebracht werden, wirken auf die Hinterräder. Es müssen hier zwei Fahrdrähte zur Hin- und Rückleitung des Stromes angebracht sein, weil eben keine Schienenrückleitung besteht. Auf dem Dach des Wagens sind zwei steife Stangen von 5 bis 5,5 m Länge angebracht, welche nach allen Richtungen hin drehbar sind. An ihrem Ende tragen sie Kontaktstücke, Schleifschuhe, welche durch die Stangen von unten an die Fahrdrähte angedrückt werden und stets sicher Kontakt bewirken. Durch die große Länge der Kontaktstangen kann der Wagen auf der Landstraße ausweichen. Es können auch mehrere Wagen an denselben Fahrdrähten in gleicher oder entgegengesetzter Richtung laufen, wobei bei der Begegnung ein Wagen ausweicht, für kurze Zeit seine Stange herunterzieht, bis der andere Wagen vorbei ist, und dann weiterfährt. Für die Beförderung von Personen und Gütern zwischen Orten, an denen kein sehr dichter Verkehr ist, so daß eine Anlage von Schienen sich nicht lohnt, ersetzt eine solche Bahn in billiger und rentabler Weise den Pferdebetrieb. Die Hauptschwierigkeit besteht in der Verfassung der Straßen, welche durch den Wagen selbst allmählich noch verschlechtert wird.

Die Ersetzung des Pferdebetriebs durch Maschinenbetrieb hat in den letzten Jahren bekanntlich auch in dem gewöhnlichen Fuhrwesen enorme Fortschritte gemacht, indem man Droschken, Equipagen, Omnibusse, Gepäckwagen u. s. w. als Automobile eingerichtet hat. Die meisten dieser Automobile werden so betrieben, daß sie einen Benzinmotor mit sich führen. Sie haben daher die Nachteile, daß sie nicht ungefährlich sind, daß sie infolge der hin und her gehenden Bewegung des Motorkolbens und des verpuffenden Dampfes Lärm machen, der namentlich für die Fahrenden selbst auf die Dauer lästig ist, und daß sie, was namentlich die Nebenmenschen merken, unangenehm riechenden und schmutzenden Dampf verbreiten. Von allen diesen Nachteilen wäre ein elektrisches Automobil frei, da ein Elektromotor von selbst eine rotierende Bewegung hat und nicht erst eine hin und her gehende in eine rotierende umzusetzen braucht, und da bei einem Elektromotor von Geruch, von Schmutz und von Gefahr keine Rede ist. Aber um ein Automobil elektrisch zu betreiben, muß man außer dem Motor, der an sich leicht ist, noch eine Akkumulatorenbatterie mitführen, und diese bildet den großen, im wahren Sinne schwerwiegenden Nachteil der elektrischen Automobile, die in Frankreich zweckmäßig als Elektromobile bezeichnet werden. Trotzdem werden solche bereits jetzt konstruiert und man hofft auf verschiedenen Seiten, daß auch hier die Elektrizität die anderen Kräfte aus dem Felde schlagen wird.

Um ein Automobil elektrisch zu betreiben, müssen die Räder des Wagens durch einen Elektromotor in Bewegung gesetzt werden, und der Motor muß seinen Strom von einer Akkumulatorenbatterie erhalten. Eine Ausführung eines solchen Wagens als Viktoriawagen (von Kühlstein, Charlottenburg) zeigt Fig. 514. Die Akkumulatorenbatterie ist

in 2 Teile geteilt, von denen die eine unter dem Sitz des Führers, die andere hinter dem Rücksitz angebracht ist. Jedes Hinterrad wird durch einen besonderen Elektromotor angetrieben. Die Motoren leisten jeder 2 bis 2,5 HP. Sie sind federnd aufgehängt und auch der ganze Wagenkasten ist mit dem Untergestell durch Federn verbunden. Vorn beim Wagenführer ist erstens eine kräftige, durch den Fuß zu betreibende Bremse und außerdem ein Steuer zur Lenkung des Wagens und ein Regulator zum Anfahren, zur Änderung der Geschwindigkeit und zum elektrischen Bremsen, was durch Widerstände bewirkt wird. Diese Regulatoren werden auch hier Kontroller genannt und ganz ähnlich eingerichtet, wie beim Trambahnbetrieb (s. o. S. 544). Bei dem gezeichneten Automobil liegt der Kontroller horizontal unter dem mittleren Teil des Wagens.

Fig. 514.



Er ist so eingerichtet, daß er drei verschiedene Geschwindigkeiten zu erzielen gestattet und außerdem noch durch Rückwärtsbewegung der Motoren eine kräftige elektrische Bremsung auszuführen erlaubt.

Als äußeres Kennzeichen, daß ein Automobil elektrisch betrieben wird, dient immer ein Volt- und Amperemeter, welches vorn beim Führer angebracht wird und diesen über Strom und Spannung seines Motors auf dem laufenden hält, welches aber insbesondere auch beim Laden der Batterie notwendig ist. Fig. 515 zeigt ein solches kombiniertes Instrument von Hartman & Braun. Natürlich werden bei einem solchen Wagen alle Errungenschaften der modernen Automobiltechnik benutzt, um ihn möglichst leicht und leichtgehend zu machen. In derselben Weise kann man auch größere Wagen, Omnibusse, Paketwagen etc. einrichten, wobei dann die Akkumulatorenbatterie entsprechend größer genommen werden kann. Was den Effektverbrauch anbetrifft, so wird angegeben, daß ein zweisitziger Wagen bei zirka 25 km Geschwindigkeit und 80 Volt

Spannung der Batterie etwa 20 Ampere verbraucht. Der Effekt ist danach 1600 Watt, gleich etwas über 2 Pferdekräften.

Solche Automobile eignen sich naturgemäß bisher nur für den Verkehr innerhalb derjenigen Orte, in denen elektrische Zentralen vorhanden sind. Durch diese kann die Batterie nach gewissen Zeiten wieder geladen werden und es sind die Bleiakkumulatoren so eingerichtet, daß jetzt für 40 bis 50 km Fahrt eine Ladung ausreicht. Zu größeren Ausflügen lassen sich bisher diese elektrischen Automobile nicht benützen, weil sie nicht für sehr lange Zeit Energie mit sich nehmen können. Doch hängt dieser Nachteil nur von der noch geringen Verbreitung der elektrischen Zentralen ab. Könnte man darauf rechnen, in jedem Dorf elektrischen Strom (und zwar Gleichstrom zum Laden der Akkumulatoren oder Wechselstrom mit Umformern) zu finden, wie es in einigen Teilen der Schweiz bereits der Fall ist, so könnte man mit solchen Elektromobilen auch große Touren unternehmen, und es ist zu hoffen, daß es dazu noch einmal kommen wird. Der neue Edisonsche Akkumulator (S. 414), wenn er sich

Fig 515.

bewährt, wird hier jedenfalls ein wichtiges Gebiet seiner Anwendung finden.

Für die Schiffahrt im großen ist der elektrische Betrieb natürlich nicht brauchbar. Große Schiffe haben ihre Dampfmaschinen und brauchen die Umsetzung der Dampfkraft in Elektrizität nicht. Dagegen lassen sich kleine Vergnügungsboote, in welche man keine Dampfmaschinen bringen will, elektrisch betreiben, und zwar auch mittels Akkumulatoren, die an der Landungsstelle von einer Dynamomaschine geladen werden. Derartige Boote sind in den letzten Jahren vielfach gebaut worden. Aber auch als Fährboote und als Revisionsboote für Zollbehörden und allgemein als Dienstboote für Behörden werden sie jetzt vielfach benutzt. Fig. 516 gibt eine Ansicht eines kleinen Vergnügungsbootes, welches Akkumulatoren der Hagener Fabrik besitzt. Dasselbe enthält 40 Akkumulatoren mit einer Leistung von 220 Amperestunden und einen dreipferdigen Motor. Das Gewicht der elektrischen Ausrüstung beträgt 1950 kg. Die allgemeine Anordnung der elektrischen Einrichtung solcher Boote ist aus Fig. 517 zu ersehen. Man sieht am Boden des Bootes die Akkumulatorenkästen A A, welche den Motor M antreiben. Dessen Achse ist direkt mit der Schiffsschraube verbunden. Am Führerstand F ist ein Kontroller

angebracht, mit welchem der Steuermann durch Drehen einer Kurbel Widerstände ein- oder ausschalten und so die Geschwindigkeit des Schiffes verändern kann. Bei einer Geschwindigkeit von 10 Kilometer pro Stunde kann das oben dargestellte kleine Boot mit einer Ladung 20 Stunden fahren, also 200 Kilometer zurücklegen.

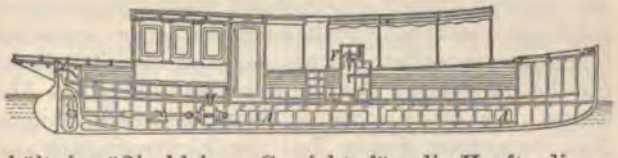
In letzter Zeit hat man begonnen, die Elektrizität für die Schleppschiffahrt geeignet zu machen, was um so wichtiger ist, da die Anlegung großer Kanäle, wie sie jetzt in Aussicht stehen, erfordert, daß auf diesen der Transport mit möglichst vollkommenen Mitteln geschehe.

Fig. 516.

Von den verschiedenen Systemen, die sich dem elektrischen Betrieb hierbei bieten, ist vollständig durchgearbeitet und am Finowkanal erprobt dasjenige von Siemens & Halske. Bei diesem läuft neben dem Kanal, auf dem sogenannten Treidelweg, eine elektrische kleine Lokomotive auf einer Schiene und zieht durch das Treidelseil die Schiffe, ganz so, wie es bisher durch Pferdekraft oder Menschenkraft geschah. Es ist anzunehmen, daß dieses System der elektrischen Treidelei sich in vieler Beziehung als vorteilhaft erweisen wird.

Die Anwendung der Elektrizität für den Betrieb lenkbarer Luftballons ist bisher, trotz einiger im kleinen gelungener Versuche, noch eine unerfüllte Hoffnung. Der Elektromotor zwar eignet sich vortrefflich zum Antrieb der Luftschrauben, die ein solcher Ballon besitzt. Er hat ein verhältnismäßig kleines Gewicht für die Kraft, die er leisten kann. Aber zum Betätigen des Elektromotors muß man die Elektrizität in Akkumulatoren aufgespeichert mitführen und diese sind, soweit sie jetzt leistungsfähig konstruiert sind, ein schwerer Ballast. Sollte es gelingen, sehr leichte und wirksame Akkumulatoren zu konstruieren — wozu allerdings wenig Aussicht ist —, so würde auch dieses schwierige Problem des lenkbaren Luftschiffes vielleicht eine Lösung finden.

Fig. 517.



11. Kapitel.

Die Elektrochemie.

Schon vor dreißig Jahren sprach Werner Siemens, der Schöpfer der modernen Elektrotechnik, aus, daß in dem Bereich der chemischen Prozesse dem elektrischen Strom noch die größte Zukunft bevorzustehen scheine. „Gerade auf diesem Gebiete", sagt Siemens, „wird der elektrische Strom voraussichtlich künftig die größten Erfolge aufzuweisen haben und auf ihm der Menschheit die größten Dienste leisten können. Technisch noch ganz unbebaut liegt das weite, so viel versprechende Gebiet der Elektrolyse feuerflüssiger Leiter da, und weder die wissenschaftliche noch die technische Chemie hat die analytische und synthetische Kraft des Stromes bisher gebührend gewürdigt."

Es hat lange gedauert, bis diese Voraussage sich zu erfüllen begann, aber dafür wird in den letzten Jahren mit um so größerem Eifer die Ausbildung gerade dieser neuen Technik, der Elektrochemie, von vielen Seiten in Angriff genommen, und diese Bestrebungen haben schon sehr wertvolle Früchte getragen und versprechen noch viele neue ungeahnte Errungenschaften.

Unter der Elektrochemie verstehen wir hier ganz allgemein die Darstellung chemischer Stoffe auf elektrischem Wege. Wir verstehen nicht darunter die Galvanoplastik, obwohl diese sich auch der Elektrolyse bedient, da es der Elektrochemie wesentlich auf die Stoffe ankommt, die sie bereitet, der Galvanoplastik aber auf die Form, in welcher sie die erzeugten Stoffe benutzt.

Die Aufgaben, die die Elektrochemie bisher im wesentlichen hat lösen können, sind folgende: Erstens die Gewinnung reiner Metalle aus hüttenmännisch gewonnenen zusammengesetzten Produkten oder aus sonstigen natürlich vorkommenden oder künstlich hergestellten Verbindungen derselben. Diese Aufgabe ist mit vollem Erfolg gelöst worden für die Darstellung des Kupfers, des Goldes, des Aluminiums, des Magnesiums, des Zinns, Arsens, Antimons und einiger anderer Substanzen. Man bezeichnet diesen Teil der Elektrochemie zweckmäßig als elektrische Metallurgie.

Eine zweite Aufgabe besteht in der Herstellung wertvollerer chemischer Verbindungen aus minder wertvollen durch Vermittelung des elektrischen Stromes. Diese Aufgabe ist bisher im wesentlichen gelöst bei der Erzeugung von Soda, von Chlor und von Ätzkali und Ätznatron durch Hilfe der Elektrolyse und bei der Erzeugung von Calciumkarbid mit Hilfe des elektrischen Lichtbogens.

Die dritte Aufgabe besteht in der Herstellung gewisser chemischer Stoffe, welche sofort bei ihrem Entstehen durch Oxydation oder Reduktion von schon vorhandenen Substanzen wertvolle Dienste leisten. Zu dieser Abteilung gehört die elektrische Darstellung des Ozons, ferner die Herstellung von Bleichflüssigkeiten und die Methoden zur Reinigung der Ablaufwässer.

Das hauptsächlichste Mittel, dessen sich die Elektrochemie bedient, ist die Elektrolyse, die Eigenschaft des galvanischen Stromes, daß er zusammengesetzte Flüssigkeiten in ihre Bestandteile zerlegt. Aber die Elektrolyse ist nicht das einzige Hilfsmittel der Elektrochemie, vielmehr macht sie sich auch jede andere brauchbare Eigenschaft des elektrischen Stromes dienstbar. Dazu gehören hauptsächlich die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes und insbesondere die außerordentlich hohen Temperaturen, welche man durch den elektrischen Lichtbogen erzeugen kann, bei denen alle Substanzen, selbst die am schwersten schmelzbaren (außer der Kohle), mit Leichtigkeit flüssig werden. Eine weitere Eigenschaft der Elektrizität, welche bei der Darstellung des Ozons angewendet wird, ist die Entladung hochgespannter Elektrizität durch Gase, welche mit einer Veränderung dieser Gase verbunden ist, die vielleicht auch elektrolytischer Natur ist.

Es ist selbstverständlich, daß die Technik auch, wo es für sie von Vorteil ist, rein chemische Prozesse zur Unterstützung der elektrolytischen Prozesse mit zu Hilfe nimmt und gerade in der Vielseitigkeit, welche die Kombination von elektrolytischer und rein chemischer Umsetzung bietet, liegt die Aussicht auf eine großartige Weiterentwicklung dieser neuen Technik.

Die Elektrolyse, das wichtigste Hilfsmittel der Elektrochemie, besteht, wie im ersten Teil Kap. 6 ausführlich auseinandergesetzt ist, darin, daß der elektrische Strom, wenn er durch eine zusammengesetzte leitende Flüssigkeit gesendet wird, bewirkt, daß die beiden Bestandteile dieser Flüssigkeit, die Ionen, sich an den Elektroden abscheiden, der positive Bestandteil, das Kation (das Metall resp. der Wasserstoff), an der Kathode, der Rest, das Anion, an der Anode. Das Grundgesetz der Elektrolyse, das bei allen Anwendungen derselben stets Gültigkeit hat, ist das Gesetz von Faraday, welches aussagt, daß die Menge der zersetzten Flüssigkeit, also auch die Menge der abgeschiedenen Ionen wächst mit der Stärke des Stromes und mit der Dauer des Stromdurchgangs und daß diese Mengen bei den verschiedenen Stoffen im Verhältnis von deren chemischen Äquivalenten stehen.

Da die chemischen Äquivalentzahlen für alle Substanzen bekannt sind, und da man aus Experimenten weiß, wie viel Kupfer der Strom 1 Ampere in 1 Sekunde oder Minute oder Stunde abscheidet (S. 140), so kann man sofort angeben, wie viel von jeder chemischen Substanz an einer Elektrode abgeschieden werden wird, wenn eine Elektrizitätsmenge gleich 1 Amperestunde (also der Strom 1 Ampere 1 Stunde lang, oder der Strom 5 Ampere $^1/_5$ Stunde lang u. s. w.) durch eine Lösung dieser Substanz hindurchgeht. Eine Reihe solcher Zahlen ist in folgender Tabelle zusammengestellt:

Durch 1 Amperestunde werden abgeschieden:

Name des Stoffes	mg	Name des Stoffes	mg
Aluminium	337,0	Nickel	731 – 1096
Blei	3858,4	Platin	3632,4
Eisen	1047 – 698	Silber	4026
Gold	2452	Zink	1217,2
Kupfer	1181 – 2362	Zinn	2221
Magnesium	454,3	Chlor	1323
		Jod	4730
		Sauerstoff	298

Bei einigen dieser Stoffe, nämlich Eisen, Kupfer, Nickel, sind zwei verschiedene Zahlen angegeben. Das kommt daher, daß diese Stoffe zwei verschiedene Äquivalentgewichte besitzen, je nach der Verbindung, in der sie stehen. Unter dem Äquivalentgewicht einer Substanz versteht man ja das Atomgewicht derselben (welches unveränderlich ist), dividiert durch die Valenz (Wertigkeit) der Substanz, welche eben in verschiedenen Verbindungen verschieden sein kann. Z. B. Kupfer ist gewöhnlich zweiwertig. Aus Schwefelsäure SO_4H_2 und Kupfer wird Kupfervitriol SO_4Cu, woraus man sieht, daß 1 Atom Kupfer 2 Atome Wasserstoff (H_2) ersetzt, daß also Kupfer hier zweiwertig ist. Eine solche Verbindung ist z. B. auch das Kupferchlorid $CuCl_2$, in welchem 1 Atom Kupfer mit 2 Atomen Chlor verbunden ist. Da nun das Atomgewicht des Kupfers 63,18 ist, wie die Chemie bestimmt hat, so ist das Äquivalentgewicht des Kupfers in solchen Verbindungen 31,59. Dagegen gibt es andere Verbindungen des Kupfers, die sogenannten Oxydulverbindungen oder Kuprosalze, in denen das Kupfer einwertig ist. Eine solche Verbindung ist das wichtige Kupferchlorür CuCl (oder Cu_2Cl_2), in welchem 1 Atom Kupfer mit 1 Atom Chlor verbunden ist. In diesen Verbindungen ist daher das Äquivalentgewicht doppelt so groß, nämlich 63,18 und daher wird durch den Strom 1 Ampere aus ihnen in einer Stunde doppelt so viel Kupfer (nämlich 2362 mg) abgeschieden, wie aus den anderen Verbindungen, die man Oxydverbindungen oder Kuprisalze nennt, und bei denen diese Menge bloß 1181 mg beträgt. Zu den Oxydulverbindungen des Kupfers gehört außer dem Kupferchlorür noch das Kupferjodür CuJ, das Kupferoxydul Cu_2O und das Kupfersulfür Cu_2S, welches letztere nichts anderes als der natürlich vorkommende Kupferglanz ist.

Ähnlich ist es beim Eisen, nur daß das Eisen nicht ein- oder zweiwertig, sondern zwei- oder dreiwertig ist. Aus Schwefelsäure SO_4H_2 und Eisen Fe wird Eisenvitriol SO_4Fe, wobei also das Eisen zweiwertig ist. Diejenigen Verbindungen, in welchen das Eisen zweiwertig ist, nennt man Oxydulverbindungen (oder Ferrosalze). Zu diesen gehört außer dem Eisenvitriol das Eisenchlorür $FeCl_2$, das Eisenoxydul FeO, das kohlensaure Eisen CO_3Fe (Spateisenstein), das Eisensulfür FeS. Dagegen in anderen Verbindungen ist das Eisen dreiwertig, und diese nennt man Oxydverbindungen oder Ferrisalze. Zu ihnen gehört das Eisenchlorid $FeCl_3$ (oder besser Fe_2Cl_6) und das Eisenoxyd Fe_2O_3 (Roteisen-

stein). Das Atomgewicht des Eisens ist 55,88, also ist das Äquivalentgewicht desselben in den Ferrosalzen 27,94, in den Ferrisalzen 18,63, so daß aus den Ferrosalzen durch 1 Amperestunde 1047 mg, aus den Ferrisalzen aber nur 698 mg abgeschieden werden. Ebenso ist Nickel zwei- oder dreiwertig.

Hat man nun irgend eine Metallsalzlösung in einem Gefäß (Bad) und sendet man einen Strom durch das Bad, welches ja einen bestimmten Widerstand hat, so gehört zunächst eine bestimmte Spannungsdifferenz dazu, um den Strom überhaupt durch den Widerstand zu senden. Diese Spannung ist nach S. 68 gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Bades; denn so groß ist der Spannungsverlust, den der Strom erleidet, wenn er nur den bestimmten Widerstand überwindet.

Außerdem aber entsteht ja, wie wir wissen, stets, wenn durch einen Elektrolyten ein Strom hindurchgesendet wird, eine elektromotorische Gegenkraft, die der Polarisation, und die Spannung des Stromes, der durch den Elektrolyten geht, muß also diese Polarisation auch noch überwinden, d. h. also die gesamte Spannung des Stromes, durch den Elektrolyse erfolgen soll, muß mindestens gleich sein der Summe

1. aus der elektromotorischen Kraft der Polarisation und
2. dem Spannungsverlust infolge des Widerstandes des Bades.

Wenn man z. B. einen Strom mittels Platinelektroden durch eine Lösung von Kupferchlorid gehen läßt, so hat die entstehende Polarisation eine elektromotorische Kraft von 1,35 Volt. Hat nun das Bad einen Widerstand von 0,5 Ohm und läßt man Ströme von 1, 2, 3 Ampere hindurchgehen, so ist der Spannungsverlust im Bad 0,5; 1; 1,5 Volt, also ist der gesamte Spannungsunterschied an den beiden Enden des Bades gleich

1,85; 2,35; 2,85 Volt.

Von der Spannung, von der Zahl der Volt, die man zu einem elektrolytischen Prozeß braucht, und von der Stromstärke hängen aber wesentlich die Kosten des Prozesses ab. Denn der Effekt des Stromes, d. h. die Arbeit pro Sekunde, die der Strom in dem elektrolytischen Bad leistet, ist ja immer gleich:

Anzahl der Volt × Anzahl der Ampere.

Um diesen Effekt zu erzeugen, muß man entweder eine Dynamomaschine treiben oder galvanische Elemente anwenden, in denen Zink verbrannt wird, d. h. den Effekt muß man durch Aufwand von Kosten hervorbringen. Die nutzbare Leistung bei dem elektrolytischen Prozeß hängt aber von der Menge der abgesetzten Ionen, also nach dem Faradayschen Gesetz nur von der Stromstärke ab. Man sieht daraus, daß die nutzbare Leistung um so größer wird im Verhältnis zum Gesamtaufwand, je kleiner die notwendige Spannung ist.

Wir haben also als erste Folgerung:

Ein elektrolytischer Prozeß wird um so vorteilhafter sein, je geringer die notwendige Spannung des Stromes ist.

Sehr drastisch kann man die eben erörterte Tatsache so ausdrücken

daß man sagt, bei einem technischen elektrolytischen Prozeß bringen die Ampere Geld und die Volt kosten Geld.

Es kommt also wesentlich für einen ökonomischen Betrieb darauf an, die Volt, die Spannung des Bades, möglichst klein zu machen. Die Spannung setzt sich aber, wie eben erwähnt, aus zwei Teilen zusammen, der Widerstandsspannung und der Polarisationsspannung, wie man sie kurz nennen kann.

Da nun die zur Überwindung des Widerstandes des Bades notwendige Spannung, die Widerstandsspannung, nicht veränderlich ist, wenn der Widerstand der Substanz einmal gegeben ist — sie ist ja gleich dem Produkt aus der angewandten Stromstärke und diesem Widerstand — so sieht man, daß es wesentlich darauf ankommt, die Polarisationsspannung zu vermindern, d. h. die Polarisation bei dem Prozesse möglichst klein zu machen.

Man kann das auch auf folgende Weise einsehen. Wenn wir einen galvanischen Strom in dem Bad haben, der gerade 1 Pferdekraft Effekt hat, also 736 Volt-Ampere nach S. 342, und wenn wir annehmen, daß die notwendige Spannung zum Betriebe des Prozesses in jedem Falle gerade 1 Volt wäre, so können wir aus den oben S. 558 angeführten Zahlen berechnen, wie viel Kilo der einzelnen Substanzen durch 1 Pferdekraft pro Stunde abgeschieden werden. Der Strom hätte nämlich dann die Stärke von 736 Ampere, und wir brauchen die obigen Zahlen bloß mit 736 zu multiplizieren, und statt in Milligramm in Kilo auszudrücken. Das gibt folgende Resultate:

Durch 1 Pferdekraft werden pro Stunde ausgeschieden (wenn die Spannung des Bades 1 Volt betragen würde):

Aluminium	0,248 Kilo	Nickel	0,538 Kilo 0,807 „
Blei	2,893 „	Platin	2,673 „
Eisen	0,770 „ 0,513 „	Silber	2,963 „
Gold	1,804 „	Zink	0,896 „
Kupfer	0,869 „ 1,738 „	Zinn	1,635 „
Magnesium	0,334 „	Chlor	0,974 „
		Jod	3,481 „
		Sauerstoff	0,219 „

Ist aber die notwendige Spannung des Bades nicht 1 Volt, sondern, wie z. B. bei Nickelsalzen, 4 Volt, so wird durch eine Pferdestunde nicht 0,538, sondern nur 0,135 Kilo abgeschieden. Je größer die notwendige Spannung ist, desto kleiner ist also die pro Pferdekraft und Stunde abgeschiedene Menge der Metalle, und umgekehrt.

Für einen möglichst nutzreichen elektrochemischen Betrieb ist also die notwendige Bedingung, daß die Polarisation im Bade möglichst klein gemacht werde. Nun beruht die Polarisation darauf, daß die beiden Elektroden des Bades infolge der Elektrolyse chemisch different gegeneinander sind. Je verschiedener die beiden Elektroden gegeneinander sind, d. h. je weiter sie in der Spannungsreihe auseinander stehen, desto größer ist die Polarisation.

Man kann das aber auch noch in anderer Weise auffassen. Wenn ein Strom durch den Elektrolyten hindurchgeht und dessen Ionen trennt, so muß er eine bestimmte Arbeit leisten. Diese Arbeit ist so groß wie die sogenannte Wärmetönung des betreffenden Prozesses, nur daß diese gewöhnlich in Kalorieen, im Wärmemaß ausgedrückt ist, während man die Arbeit in Kilogrammetern mißt. Man braucht aber bekanntlich bloß die (kleinen) Kalorieen mit 0,435 zu multiplizieren, um sie in Kilogrammeter umzuwandeln. Also z. B. wenn Kupfersulfat $CuSO_4$ in wässeriger Lösung zersetzt werden soll, so braucht man dazu eine Arbeit von 55 960 kleinen Kalorieen oder

$$55\,960 \times 0{,}435 \text{ Kilogrammeter}$$

für je ein zerlegtes Grammolekül Kupfersulfat (d. h. für 159 g, entsprechend der Formel $CuSO_4$). Diese Arbeit muß der Strom leisten, diese Arbeit steckt aber dann auch wieder aufgespeichert in der elektrolytischen Zelle. Es scheidet sich eben an der einen Elektrode das Kupfer, an der anderen die Schwefelsäure ($SO_3 + O$) aus. Diese Substanzen polarisieren die Elektroden und in der Polarisation steckt eben wieder eine Quelle von Arbeitsmöglichkeit, denn die polarisierten Elektroden können, wenn sie verbunden werden, wieder einen Strom, den Polarisationsstrom erzeugen, können also Arbeit leisten. Wenn man nun aber die abgeschiedenen Substanzen, welche als freie Ionen zum Teil sehr reaktionsfähig sind, an den Elektroden nicht frei auftreten läßt, sondern sie neue Verbindungen eingehen läßt, so entsteht wieder eine Wärmemenge statt der vorher verbrauchten, und infolgedessen ist die zur Elektrolyse notwendige Wärmemenge nun kleiner als vorher, folglich ist auch die in der Zelle aufgespeicherte Arbeit dann kleiner als vorher, d. h. die Polarisation ist geringer.

Damit haben wir das Mittel gefunden, durch welches wir die Polarisation verkleinern können. Wir müssen es so einrichten, daß die Ionen an der einen oder an beiden Elektroden neue Verbindungen eingehen, die eine der zu überwindenden Wärmetönung möglichst gleiche erzeugen.

Ein Zahlenbeispiel wird das klar machen. Wenn wir eine Zelle mit Kupfervitriollösung haben und als Elektroden Platinplatten verwenden, so brauchen wir zur Zersetzung des Kupfervitriols, wie oben angegeben, $55\,960 \times 0{,}435$ Kilogrammeter Arbeit für je ein Molekül, das sind hier 2 Äquivalente Kupfer, die sich abscheiden. Diese 24 343 Kilogrammmeter Arbeit für je 2 abgeschiedene Äquivalente Kupfer stecken nun aufgespeichert in der Zelle und zwar in der Form der Polarisation. Fließt der Polarisationsstrom, so kann er also wieder dieselbe Arbeit leisten. Daraus können wir zunächst die elektromotorische Kraft der Polarisation berechnen. Ein Strom nämlich, der 2 Äquivalente Kupfer abscheidet, muß (nach S. 144) $2 \times 96\,540$ Coulomb mit sich führen. Nun ist aber die Zahl der Volt mal der Zahl der Coulomb (hier eben: $2 \times 96\,540$) dividiert durch 9,81 gleich der von dem Strom geleisteten Arbeit in Kilogrammmetern (hier also: 24 343), also ist in unserem Fall die Zahl der Volt gleich $\frac{24\,343 \times 9{,}81}{2 \times 96\,540} = 1{,}56$. So groß wäre also die elektromotorische Kraft der Polarisation, wenn keine Nebenprozesse stattfinden.

Macht man nun aber die Anode nicht aus Platin, sondern aus Kupfer und schickt man jetzt einen Strom hindurch, so verbindet sich sofort das Anion SO_4 mit dem Kupfer zu neuem Kupfersulfat und infolgedessen entsteht nun wieder eine Wärmetönung von 55 960 Kalorieen, also hebt sich die vom Strome bei der Ausscheidung des Kupfers (an der Kathode) geleistete und die bei der Auflösung des Kupfers (an der Anode) gewonnene Wärmetönung auf, mithin steckt jetzt keine Arbeit mehr aufgespeichert in der Zelle, d. h. die Polarisation ist nun gleich Null geworden. In der Tat hat man jetzt keine Polarisation mehr, weil nun eine Kupferplatte und eine mit Kupfer bedeckte Platinplatte in die Flüssigkeit tauchen, die keine elektrische Differenz haben.

Das Mittel also, um mit möglichst niedrigen Spannungen auszukommen, besteht darin, daß man Vorsorge trifft, daß die Ionen an den Elektroden die Möglichkeit vorfinden, in chemische Verbindungen einzutreten (die natürlich dem Prozeß nicht schädlich sein dürfen), oder mit anderen Worten, man muß den Ionen Gelegenheit geben, an den Elektroden Arbeit zu leisten.

Da bei den metallurgischen Prozessen das Kation (das Metall) dasjenige Produkt ist, dessen Reindarstellung man wünscht, so handelt es sich also wesentlich darum, an der Anode chemische Arbeitsgelegenheit zu schaffen. An der Anode tritt nun immer derjenige Bestandteil des Elektrolyten auf, welcher oxydierend wirkt, also z. B. SO_4 oder NO_3 oder Cl u. dergl. Man muß daher für reichliche Oxydationsarbeit an der Anode Sorge tragen. Das wird man in vielen Fällen dadurch erreichen, daß man als Anode eine Substanz in das Bad bringt, welche durch die Wirkung des Anions selbst aufgelöst wird und dadurch möglichst dieselbe Verbindung entstehen läßt, welche elektrolysiert wird, wie in unserem Beispiel eine Kupferplatte. Man kann aber auch das Anion zunächst auf die elektrolytische Flüssigkeit wirken lassen, nicht auf die Anode, und diese in zweckmäßiger Weise oxydieren lassen. Wir werden Beispiele von beiden Methoden unten kennen lernen.

Mit dieser Betrachtung hängt noch folgende wichtige Frage zusammen. Für einen elektrolytischen Prozeß mit gegebenen Elektroden ist nicht jede Stromstärke gleich gut geeignet, sondern es muß vielmehr die Stromstärke in einem passenden Verhältnis zu der Oberfläche der Elektroden stehen. Um das einzusehen, nehmen wir wieder an, daß wir Kupfervitriol zersetzen, und daß die Anode aus Kupfer besteht. Die Anode habe eine bestimmte Oberfläche, z. B. von $^1/_2$ qm. Wenn der Strom hindurchgeht, so tritt an der Anode SO_4 auf, welches sie auflöst und zu $CuSO_4$ umwandelt. Je stärker der Strom ist, desto mehr SO_4 tritt in gleicher Zeit auf, desto mehr $CuSO_4$ wird also entwickelt. Das geht aber natürlich nur so lange fort, bis nicht die Abscheidung von SO_4 eine zu reichliche ist. Ist sie nämlich zu groß, d. h. ist die Stromstärke zu groß, so findet das SO_4 nicht mehr eine genügende Fläche an der Anode vor, um das Kupfer aufzulösen. Daraus sieht man, daß je nach der Größe der Anode man höchstens eine bestimmte Stromstärke anwenden darf, um den Prozeß zweckmäßig zu führen. Ist die Anode doppelt so groß, also in unserem Falle 1 qm, so kann man natürlich auch die doppelte Stromstärke anwenden. Man bezeichnet

das Verhältnis der Stromstärke zur Größe der Anodenfläche als die Stromdichtigkeit und muß also sagen, für jeden Prozeß ist eine maximale Stromdichtigkeit vorhanden, die ohne Schaden nicht überschritten werden kann. Die Stromdichtigkeit wird gewöhnlich angegeben als Zahl der Ampere pro Quadratmeter Anodenfläche.

Dieselbe Betrachtung gilt aber auch für die Kathode. Auch da ist die Stromdichtigkeit von wesentlichem Einfluß auf das Produkt der Elektrolyse. Ist z. B. die Stromstärke zu groß im Verhältnis zur Größe der Kathode, so scheidet sich zu viel Metall ab, und dieses kann dann häufig bei seiner Entstehung das Wasser mehr oder minder zersetzen. Es bildet sich dann kein kompakter Niederschlag des Metalls, sondern ein schwammiger oder poröser. Also ist eine weitere Forderung für jeden elektrochemischen Prozeß, daß man die günstigste Stromdichte durch Versuche ermittelt. Es kann der Fall vorkommen, daß eine bestimmte Stromstärke zwar für die Anode gerade passend ist, für die Kathode aber zu klein oder zu groß ist. Dann muß man eben die Fläche der Kathode größer oder kleiner machen als die Anodenfläche.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen gehen wir nun dazu über, einige wichtige elektrochemische Prozesse zu besprechen, die bisher in die Praxis eingeführt wurden.

Am längsten wird die Elektrolyse benutzt zur Gewinnung des Reinkupfers, nicht aus den natürlich vorkommenden Kupfererzen selbst, sondern aus dem sogenannten Schwarzkupfer, welches aus den natürlichen Erzen durch hüttenmännisches Verfahren erhalten wird. Das Schwarzkupfer enthält hauptsächlich Kupfer, aber dabei noch Verunreinigungen von Schwefelkupfer, Schwefeleisen, auch von Silber, Platin, Gold, Wismut, Zinn etc. Es handelt sich darum, aus diesem unreinen Kupfer durch Elektrolyse ganz reines — daher viel wertvolleres — Kupfer zu erhalten und zugleich die wertvolleren Beimischungen, Silber etc., zu gewinnen.

Zu dem Zweck wird das Schwarzkupfer in Form von großen dicken Platten gegossen und diese werden als positive Elektrode (Anode) in ein Bad von schwefelsaurem Kupfer, das noch sauer ist, gestellt. Als negative Elektrode dient eine gleich große, dünne Scheibe von reinem Kupfer. Wird ein Strom durch das Bad geschickt, so löst sich das unreine Kupfer in der durch die Elektrolyse an ihm auftretenden Schwefelsäure auf, während das reine Kupfer an der negativen Elektrode sich abscheidet, wenn man die Stromstärke passend wählt. Man rechnet für jeden Quadratmeter Elektrodenfläche 50 bis 100 Ampere. Aus der positiven Elektrode gehen die Verunreinigungen teilweise in die Kupfervitriollösung (Lauge), teilweise setzen sie sich zu Boden. So erhält man bei Schwarzkupfer Silber, Zinn, Wismut, Gold, Platin, Blei in geringen Mengen, welche sich im Schlamm niedersetzen und eventuell aus diesem besonders gewonnen werden könnten. In dem Hüttenwerk zu Ocker i. S., wo diese elektrolytische Reinigung des Kupfers zuerst angewendet wurde, erzeugt man schon lange auf diese Weise ein vorzüglich reines Kupfer, sogenanntes Elektrolytkupfer. Jetzt wird diese Methode in einer großen Reihe von Kupferhütten angewendet.

Wichtig ist bei diesem Prozeß eine sorgfältige Bewegung der Lauge.

Je größer die fremden Beimengungen in der Anode sind, desto größer ist die elektromotorische Kraft der Polarisation. Je unreiner also das Kupfer ist, desto größer ist die notwendige Spannung, desto weniger lohnend ist also diese Anlage. Sie ist am zweckmäßigsten, wenn in dem Rohkupfer nicht mehr als $^1/_2$ Proz. Unreinheiten enthalten sind.

Die notwendige Spannung, um die Polarisation zu überwinden, ist, wenn die Lauge noch sauer und nicht stark verunreinigt ist, bei Schwarzkupfer 0,12 Volt. Diese Spannung ist, wie man sieht, sehr gering, eben weil an der Anode wieder Kupfer aufgelöst wird.

Das so gewonnene Elektrolytkupfer wird zum Gebrauch erst geschmolzen, weil es direkt spröde und zerbrechlich ist infolge von kristallinischer Struktur. Seit der Einführung der elektrolytischen Kupferdarstellung ist es erst möglich, im Handel ganz reines Kupfer, eben das Elektrolytkupfer, zu beziehen, welches für viele Zwecke, namentlich auch für elektrotechnische Zwecke wegen seiner ausgezeichneten Leitungsfähigkeit die unreinen Kupfersorten allmählich immer mehr verdrängt.

Die Elektrolyse des Kupfers gibt auch die Mittel an die Hand, um direkt Kupferröhren ohne Naht herzustellen. Dies geschieht nach dem Verfahren von Elmore, welches in Leeds in England und in Schladern an der Sieg praktisch ausgeführt wird. Bei diesem Verfahren befindet sich in dem Bad aus schwefelsaurem Kupfer als negative Elektrode eine Eisenwalze, welche fortwährend gedreht wird und auf welcher das Kupfer niedergeschlagen wird. Als positive Elektrode wird sogenanntes Chilikupfer genommen, welches vorher durch Schmelzen und rasches Eintropfen in Wasser zu Kupferschrot gemacht wird. Dasselbe befindet sich auf einem Sieb aus Kupferdraht am Boden des Bades. Während der Elektrolyse gleitet ein Achatstein fortwährend an der rotierenden Walze hin und her und macht dadurch das gefällte Kupfer glatt und dicht. Der Strom wird der rotierenden Walze durch schleifende Bürsten zugeführt. Jedes Bad wird mit 1 Volt Spannung betrieben. Die Stromstärke kann eine sehr hohe sein, da die einzelnen abgelagerten Kupferschichten durch den Achat zusammengepreßt werden, so daß der Kupferniederschlag eine sehr hohe Dichte bekommt. Nach etwa 144 Stunden ist eine Schicht von 3,2 mm Wandstärke auf der Eisenwalze vorhanden. Hat der Kupferniederschlag die gewünschte Dicke gewonnen, so wird der Eisenkern durch geeigneten Walzendruck und Erwärmung herausgeschoben und die Kupferröhre ohne Naht ist fertig. Die so erzeugten Röhren haben eine sehr große Zugfestigkeit. Wichtig ist bei diesem Verfahren, daß die Form, die Eisenwalze, vollkommen glatt ist; jede Unregelmäßigkeit der Oberfläche der Walze hat unbrauchbare Röhren zur Folge.

Bei den bisher beschriebenen Verfahren wird durch Elektrolyse also nur schon ziemlich reines Kupfer ganz gereinigt und eventuell sofort in passende Form gebracht. Eine noch wichtigere Aufgabe ist aber die, direkt aus den Kupfererzen (also nicht erst aus dem Produkt Schwarzkupfer) das reine Kupfer zu gewinnen. Diese Aufgabe ist von verschiedenen Seiten zu lösen versucht worden. Die praktischen, nicht die prinzipiellen Schwierigkeiten sind aber bei dieser und ähnlichen

Aufgaben sehr große, so daß Prozesse, die auf dem Papier sich sehr leicht gestalten, in Wirklichkeit oft unausführbar sind. Außerdem spielt natürlich die Frage der Ökonomie eine Hauptrolle. Eine praktisch durchgeführte Lösung des Problems der Kupfergewinnung aus den Erzen ist von Siemens & Halske in die Technik eingeführt worden, und dieser Prozeß ist auch theoretisch deswegen interessant, weil er ein zweites Mittel benutzt, um Anodenarbeit hervorzubringen. Das Siemenssche Verfahren läßt sich sowohl auf kupferreiche, als namentlich auf kupferarme Erze anwenden, wobei alles Kupfer bis auf 0,1 bis höchstens 0,5 Proz. gewonnen wird. Die Kupfererze enthalten das Kupfer gewöhnlich als Kupfersulfür Cu_2S (Kupferglanz, Kupferkies, Buntkupfererz), als Kupfersulfid CuS (Kupferindig) und als Kupferoxyd CuO (Kupferschwärze), immer in Verbindung mit anderen Metallverbindungen, namentlich Eisenverbindungen. Die Erze werden nun sehr fein gepulvert und dann durch eine schwachsaure Lösung von schwefelsaurem Eisenoxyd $Fe_2(SO_4)_3$ (Ferrisulfat) ausgelaugt. Diese Substanz löst aus den Kupfererzen das Kupfer auf und bildet Kupfervitriol ($CuSO_4$), indem sie selbst ein Molekül SO_4 abgibt und sich dadurch zu Ferrosulfat ($FeSO_4$) reduziert. Die Flüssigkeit besteht also nach diesem Auslaugen aus einem Gemisch von Kupfersulfat $CuSO_4$ und Ferrosulfat $FeSO_4$. Diese Lauge wird nun in das Bad gebracht und dort elektrolysiert. Dabei bestehen die Anoden aus Kohlenstäben, die Kathoden aus Kupferblechen. Beide Elektroden befinden sich in flachen Kästen, und zwar die Kathoden oben, die Anoden, durch Tuchfilter von den Kathoden getrennt, unten. Die Lauge fließt nun kontinuierlich bei den Kathoden ein und bei den Anoden ab. Sobald der Strom hindurchgeht, wird die Lauge elektrolysiert. Die Kationen sind Kupfer und Eisen, welche sich auf der Kathode niederschlagen sollten. Das Kupfer schlägt sich auch wirklich nieder, das Eisen aber hat bekanntlich die Eigenschaft, aus Kupfervitriol Kupfer zu fällen, indem es selbst zu Eisensulfat wird. Das Resultat ist also, daß, teils als primäres, teils als sekundäres Produkt, sich nur Kupfer auf der Kathode abscheidet. An der Anode nun tritt SO_4 auf und dieses oxydiert sofort das vorhandene Ferrosulfat ($FeSO_4$) zu Ferrisulfat $Fe_2(SO_4)_3$. Hier wird also die notwendige Oxydationsarbeit nicht durch Auflösen der Anode, sondern durch Oxydieren der Flüssigkeit geleistet — eine durch dieses Verfahren zum ersten Male in die Praxis eingeführte wichtige Neuerung.

Nachdem also im Kathodenraum das Kupfer schon größtenteils ausgefällt war, wird im Anodenraum die Lauge wieder zu Ferrisulfat oxydiert, welches nun von neuem dazu benutzt wird, die vorhandenen Erze auszulaugen. Und so geht also der Prozeß kontinuierlich fort.

Die Anoden bestehen aus runden präparierten Kohlenstäben, von denen 200 Stück zu einem System von 1,35 m Länge und 0,405 m Breite durch Bleiumguß verbunden sind. Solche Anodensysteme kommen nun auf den Boden der Bäder. Es sind das flache Holzkästen, die innen durch Juteleinen gedichtet sind. Auf dem Boden, der schräg zuläuft, liegen die Anodensysteme. Über diese wird ein Leinwandfilter gelegt, welches in einen Holzrahmen gespannt ist. Dieses bildet unten den Anodenraum, über sich den Kathodenraum. Die Kathoden sind Kupfer-

bleche, die auf der Unterseite von Holzplatten angeschlagen sind. Auf diesen scheidet sich das Kupfer ab. Damit die Lauge im Kathodenraum gleichmäßig verteilt sei, wird sie dort durch ein Rührwerk geführt. In den Kathodenraum fließt die Lauge (Kupfersulfat und Ferrosulfat) oben hinein, und aus dem Anodenraum fließt unten Ferrisulfat wieder ab.

Der ganze Prozeß ist also ein Kreisprozeß und er wird durch Fig. 518 vollständig dargestellt. Darin ist A ein Gefäß, in welchem die Lauge (Kupfersulfat und Ferrosulfat) vorhanden ist und aus welchem sie durch B in den Kathodenraum k des Bades C fließt. Von dort geht sie während der Elektrolyse in den Anodenraum a, wird aber dabei zu Ferrisulfat, indem sie ihr Kupfer ganz abgibt. Das Ferrisulfat fließt durch G in einen Behälter H, in welchen die durch die Kugelmühle E gemahlenen Erze vermittels F gelangen. In diesem Behälter H ist ein Rührwerk, welches die Erze und das Ferrisulfat gut durcheinander rührt. Das Erzpulver und die jetzt wieder entstandene Lauge werden dann durch sogenannte Nutschen K getrennt. Das Erz bleibt bei L, während die Lauge durch das Rohr M wieder zum Bassin A befördert wird.

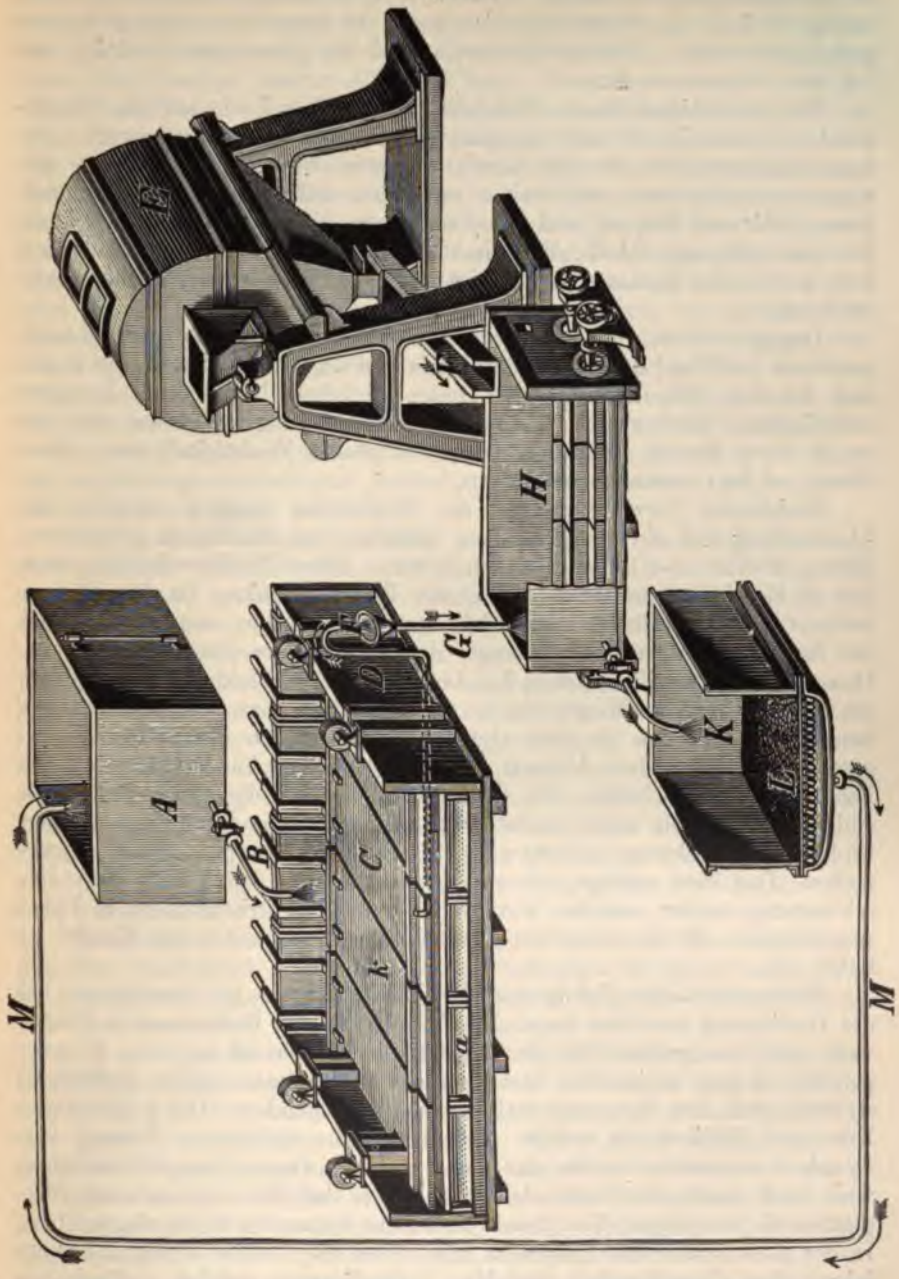
Die bei diesem Prozeß notwendige Betriebsspannung ist 1 Volt, die Stromdichte beträgt 120 Ampere pro Quadratmeter Kathodenfläche und man erhält von der theoretischen Kupfermenge in Wirklichkeit 95 Proz.

Anlagen nach diesem vorzüglich ausgebildeten System sind von Siemens & Halske in Martinikenfelde bei Berlin und in Kedabeg und Kalakent im Kaukasus ausgeführt worden. In den meisten Fällen hat sich aber diese Methode aus ökonomischen Gründen nicht als lebensfähig erwiesen.

Andere für denselben Zweck ersonnene Verfahren übergehen wir.

Für die anderen schweren unedlen Metalle außer dem Kupfer hat sich der elektrische Betrieb noch wenig eingebürgert. Um insbesondere Zink aus seinen Erzen elektrolytisch zu gewinnen, hat man verschiedene chemisch-elektrische Verfahren ersonnen, welche aber bisher der Kosten wegen noch nicht zur Einführung gebracht wurden. Ein Verfahren von Siemens & Halske, bei welchem das metallische Zink direkt aus den Erzen gewonnen wird, enthält ebenso einen vollständigen Kreisprozeß, wie ihr oben beschriebenes Kupfergewinnungsverfahren. Notwendig ist zu diesem Verfahren, daß die Zinkerze in Form von Zinkoxyd zur Verwendung kommen, wozu man also entweder direkt zinkoxydhaltige Erze oder hüttenmännisch gewonnene Produkte nehmen muß. Diese Erze werden nun klein gemahlen und durch eine warme Lösung von neutralem Aluminiumsulfat ausgelaugt. Es bildet sich dadurch eine Lösung, die ein Gemisch von Zinksulfat und einem basischen Aluminiumsulfat enthält. Diese Lösung ist nun die Lauge, die weiter elektrolysiert wird. Und zwar wird die Lösung im ganzen, also ohne Diaphragmen, in die Bäder gebracht, so zwar, daß erstens ein konstanter Zufluß und Abfluß der Lauge eingerichtet wird und daß ferner die Lauge in starker Zirkulation ist. Als Anoden werden nun Bleibleche, als Kathoden Zinkbleche in das Bad gehängt. Durch die Elektrolyse wandern Zink und Aluminium in der Richtung zur Kathode. Das Zink scheidet sich auch wirklich aus, das Aluminium aber bildet

Fig. 518.



mit der Lauge sofort wieder neutrales Aluminiumsulfat. An der Anode entsteht freier Sauerstoff. Die Lauge, die unten abfließt, besteht also wieder aus neutralem Aluminiumsulfat und kann nun wieder zur wei-

teren Auslaugung von Erzen dienen. Die Spannung bei diesem Prozeß beträgt 3 Volt, die Stromdichte kann auf 60 Ampere pro Quadratmeter gesteigert werden. Das erhaltene Zink ist ein glänzendes Produkt, das frei von Aluminium ist.

Für die elektrolytische Darstellung von Nickel hat die Gesellschaft Schuckert ein eigenes, geheim gehaltenes Verfahren. Die Ausgangsmaterialien für die Gewinnung von Nickel und Kobalt, die sogenannten Speisen und Steine, enthalten außer diesen immer noch Eisen, Zink und Kupfer, und es ist schwierig, diese während der Elektrolyse zu entfernen. Außerdem sind auch die Polarisationen bei Nickel und Kobalt, in Ermangelung geeigneter Oxydationsarbeit, immer recht erheblich.

Dagegen haben Siemens & Halske ein vollständiges und auch praktisch (in Wien) durchgeführtes Verfahren angegeben, um Antimon und Arsen rein darzustellen. Dieses Verfahren bildet ebenfalls einen vollständigen Kreisprozeß, wie ihr Kupfergewinnungsverfahren, doch ist es, da diese Metalle praktisch nicht von großer Wichtigkeit sind, überflüssig, es hier auseinanderzusetzen.

Praktische Verwendung hat die Elektrolyse dagegen erhalten zur Abscheidung des Zinns aus den Abfällen von Weißblech (verzinntes Eisen), welche 3—9 Proz. Zinn enthalten. Diese Weißblechabfälle werden in Holzkörbe verpackt und in die Bäder gesenkt. In den Bädern befindet sich verdünnte Schwefelsäure. Die Körbe werden während des Betriebes auf und ab bewegt, damit die Säure überall hinkommt. Diese Weißblechabfälle dienen als Anoden. Als Kathoden werden neben die Körbe verzinnte Kupferbleche gestellt. Das Zinn wird dann durch den Strom von den Anoden abgelöst und auf den Kathoden niedergeschlagen. Nach dem Ablösen des Zinns von den Anoden löst sich das Eisen auf und es bildet sich Eisenvitriol, so daß die Flüssigkeit nach einiger Zeit durch neue ersetzt werden muß. Die Spannung an den Bädern beträgt kaum 2 Volt, die Stromdichte 30 Ampere pro Quadratmeter. Das Zinn schlägt sich anfangs, wenn die Lösung sehr sauer ist, schwammig nieder, nachher wird es pulverig, und kristallinisch in Form von Nadeln. Es ist reiner als gewöhnliches Zinn, wie es im Handel zu haben ist.

Einen wichtigen Erfolg hat die Elektrochemie zu verzeichnen bei der Gewinnung des Goldes. In einer Reihe von Goldminen in Transvaal wird im großen Stil der sogenannte Siemensprozeß ausgeführt, dessen technische und finanzielle Resultate höchst zufriedenstellend sind. Der Siemensprozeß besteht in folgendem: Die goldhaltigen Erze und Rückstände werden mit einer sehr verdünnten Lösung von Cyankali behandelt, welche das Gold auflöst. Diese Cyangoldkalilösung wird dann durch den Strom elektrolysiert, so daß das Gold sich auf Bleiplatten niederschlägt. Von diesen wird es in bekannter Weise abgetrieben. In der Anwendung des Cyankalis zum Lösen des Goldes ähnelt das Verfahren dem Cyanidprozeß von Mac Artur-Forrest, welcher vielfach benutzt wird. Bei diesem Prozeß wird aber das Gold aus der Cyanlösung durch Zinkspäne gefällt, während es bei dem Siemensprozeß durch Elektrolyse gefällt wird. Die Folge dieses Unterschiedes ist die, daß

beim Cyanidprozeß viel konzentriertere Cyankalilösungen angewendet werden müssen (von zirka 0,3 Proz.) als bei dem Siemensprozeß, wo sie nur 0,05, ja sogar nur 0,01 Proz. Cyankali enthalten. Bei dem hohen Preis des Cyankali macht dies viel aus. Außerdem scheidet sich bei dem Cyanidprozeß das Gold als loses Pulver auf den Zinkspänen ab, während es hier als fester Niederschlag auf den Bleiplatten erscheint. Bei dem Siemensprozeß werden die goldhaltigen Substanzen (Erze oder Tailings) in möglichst feines Pulver verwandelt; dann werden sie mit der Cyankalilösung in eisernen Gefäßen von zirka 100 cbm übergossen und dadurch wird das Gold ausgelaugt. Die Goldlauge wird dann in eiserne Fällungsbehälter von zirka 20 cbm Inhalt eingelassen und dort wird sie elektrolysiert. Dabei dienen als Kathoden, wie gesagt, Bleiplatten, als Anoden aber dienen Eisenbleche. Durch die Lauge wird dieses Eisen aufgelöst und Berlinerblau gebildet, welches aber wieder in Cyankali übergeführt wird. Von dem Goldgehalt der Rückstände werden auf diese Weise zirka 70 Proz. gewonnen. Dieser Siemensprozeß verdrängt in Südafrika allmählich den Forrestprozeß, da er ebenso wie dieser die Ausbeutung sehr schwach goldhaltiger Massen gestattet und bequemer und billiger wie dieser ist.

Dies sind die sämtlichen bisher praktisch bewährten Verfahren, um Schwermetalle mit Hilfe des elektrischen Stromes zu erhalten. Das Gemeinschaftliche bei allen diesen Verfahren ist das, daß die Metalle aus den Lösungen ihrer Salze abgeschieden werden können.

Dieses Verfahren läßt sich nun bisher nicht anwenden bei den Leichtmetallen. Diese wirken im Entstehungszustande immer zersetzend auf das Wasser und können daher aus den Lösungen nicht elektrolytisch erhalten werden. Es ist allerdings durchaus nicht ausgeschlossen, daß es in Zukunft durch geeignete Verbindung von chemischer und elektrischer Umsetzung doch möglich sein wird, auch hier die bequemen Lösungen zur Elektrolyse zu benutzen. Bisher ist das aber nicht der Fall, vielmehr muß man hier die Abscheidung der Metalle aus den geschmolzenen, feurig-flüssigen Verbindungen der betreffenden Metalle vornehmen.

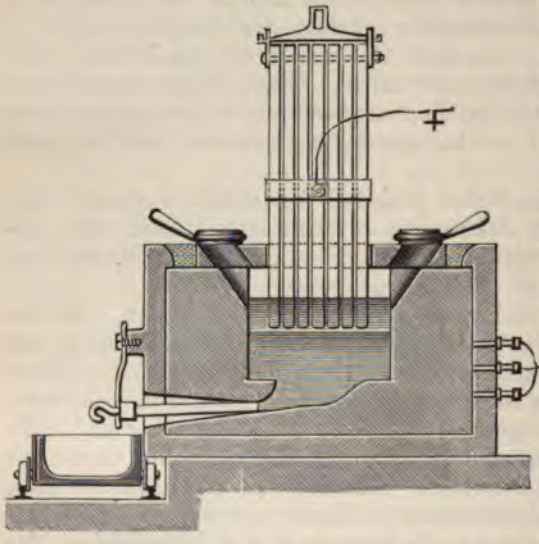
Im kleinen ist so die Darstellung fast aller dieser Metalle gelungen. Für den Großbetrieb aber sind teils die bisherigen Methoden noch nicht brauchbar, teils haben diese Metalle auch nicht so große Verwendbarkeit, daß ihre Darstellung in großen Mengen lohnen würde.

Die einzigen Metalle dieser Klasse, deren Fabrikation im großen tatsächlich vorgenommen wird, sind das Aluminium und das Magnesium, ja es ist eigentlich erst, seitdem man auf elektrischem Wege das Aluminium billig herzustellen lernte, dieses Metall Gegenstand des täglichen Gebrauchs geworden. Das Aluminium hat eben so außerordentlich wertvolle Eigenschaften, daß in vielen Fällen das Eisen und das Kupfer völlig von dem Aluminium verdrängt werden. Auch Legierungen des Aluminiums mit Kupfer und Zink, die sogenannten Aluminiumbronzen, haben sehr wertvolle Eigenschaften. Das Magnesium dagegen hat bisher noch sehr geringe Verwendung gefunden.

Zur Erzeugung des reinen Aluminiums und der Aluminiumbronzen ist unter anderen in Neuhausen in der Schweiz ein Verfahren in Ge-

brauch, welches dort von der Aktiengesellschaft für Aluminiumindustrie angewendet wird. In Neuhausen sind nämlich von den Kräften des Rheinfalles über 2000 Pferdekräfte nutzbar gemacht, um die Dynamomaschinen zu betreiben, welche den Strom liefern, der einerseits die Salze feurig-flüssig macht und andererseits sie elektrolysiert. Die neueren Einrichtungen bei dieser Fabrikation werden geheim gehalten. Im Prinzip geschieht aber die Herstellung des Aluminiums in folgender Weise. In einen großen Kohlentiegel, wie ihn Fig. 519 zeigt, der außen mit Eisen verschalt ist, wird das Fluordoppelsalz von Aluminium und Natrium gebracht, dem dann während des Betriebes fortwährend Aluminiumoxyd in geeigneter Menge zugesetzt wird. In dem Kohlentiegel befindet sich, wenn man reines Aluminium darstellen will, unten eine Kathode aus Eisen oder Kupfer, die aber durch besondere Wasserkühlung stets kalt gehalten werden, so daß sie sich mit dem abgeschiedenen Aluminium nicht legieren. Als positive Elektrode dient das oben in der Figur sichtbare Bündel von Kohlenplatten. Der Tiegel hat seitlich zwei schräge Schachte, durch welche die Tonerde eingeführt wird, und unten eine durch einen Kohlenstab verschließbare Öffnung, aus welcher das gebildete Metall abgelassen werden kann. Die positive Elektrode wird zunächst bis zur Berührung mit der negativen heruntergelassen und dann, während der Strom durchgeht, gehoben. Es bildet sich ein Lichtbogen, der das Aluminiumsalz schmilzt. Ist dieses erreicht, so wird die Anode weiter in der Schmelze in die Höhe gehoben, so daß der Lichtbogen aufhört und nun die Elektrolyse beginnt. Durch die Joulesche Wärme wird die Masse dabei immer flüssig erhalten. Es wird bei diesem Prozeß ein Strom von 15 Volt Spannung, aber von 12 000 Ampere Stromstärke angewendet. Aus der geschmolzenen Tonerde scheidet sich durch Elektrolyse das Aluminium an der negativen Elektrode ab. Bringt man auf den Boden des Tiegels geschmolzenes Kupfer oder Messing, so bekommt man Legierungen des gebildeten Aluminiums mit diesen Metallen, die Aluminiumbronzen, sonst erhält man reines Aluminium. Durch dieses Verfahren wird Aluminium in solchen Mengen dargestellt, daß sein Preis von 200 auf 2,70 Mark für 1 kg gesunken ist.

Fig. 519.



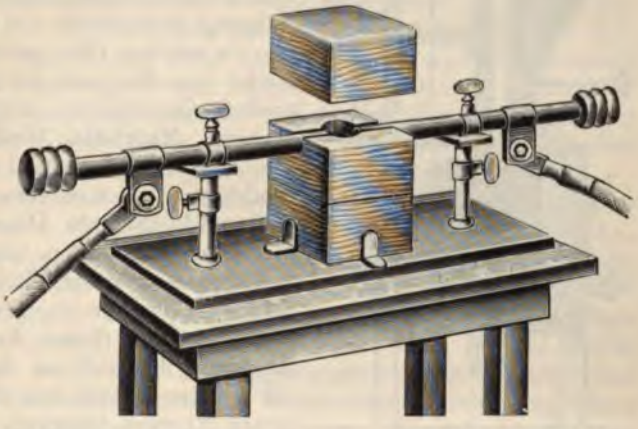
Zu dieser Aluminiumgewinnung werden kolossale Dynamomaschinen in Neuhausen benutzt, von denen die neuen jede bis zu 7500 Ampere Stromstärke liefern.

In ähnlicher Weise wird das Magnesium durch Elektrolyse des geschmolzenen Magnesiumchlorids von einer Aktiengesellschaft in Bremen hergestellt.

Bei diesen Prozessen ist es also direkt die Joulesche Wärme, die in dem Elektrolyten beim Stromdurchgang entwickelt wird, welche die Verflüssigung desselben und darauf die Elektrolyse hervorbringt.

Auch in anderen Fällen werden jetzt die hohen Temperaturen, die man durch den elektrischen Lichtbogen erhält, zur Erzeugung chemischer Stoffe, sei es durch Verbindung, sei es durch Zerlegung, benutzt. Diese Methode ist hauptsächlich von dem französischen Chemiker Moissan ausgegangen, der weitreichende und große Untersuchungen unter Anwendung des Lichtbogens gemacht hat. Er konstruierte sich für seine Zwecke einen elektrischen Schmelzofen, in welchem direkt die hohe Temperatur des Lichtbogens zur Erzielung chemischer und physikalischer Prozesse benutzt wurde. Die Ansicht eines solchen Ofens ist in Fig. 520 gegeben. Der Ofen besteht aus einem dreiteiligen Block aus Magnesit oder Schamotte, von denen der oberste den Deckel bildet.

Fig. 520.

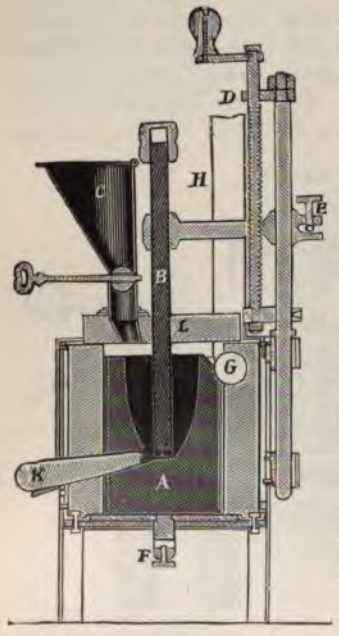


Die beiden starken Kohlen sind horizontal in den zweiten Block eingeführt, in welchem die zu schmelzende Substanz sich in einem Tiegel aus Kohle oder Magnesit oder geschmolzener Magnesia, je nach der zu erzielenden Temperatur, befindet. An die Kohlen werden seitlich die Zuleitungskabel von der Stromquelle befestigt. Diese Öfen werden von der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt in Frankfurt a. M. hergestellt.

In derartigen Öfen hat zuerst Moissan mit Strömen von 110 Volt Spannung und bis zu 1000 Ampere Stromstärke experimentiert. Im Betrieb werden die Kohlen selbst durchweg glühend und aus den Öffnungen schlagen weitreichende Flammen von 40 bis 50 cm Länge heraus. Da ein Strom von 110 Volt und 1000 Ampere einen Effekt von 110 000 Watt hat, und da 736 Watt gleich einer Pferdekraft sind, so braucht man zum Betrieb eines solchen Lichtbogens ungefähr 150 Pferdekräfte. Bei noch stärkeren Strömen, solchen bis zu 2000 Ampere, halten die Öfen aus Kalk nicht mehr, der Kalk wird flüssig wie Wasser. In diesen Fällen fütterte Moissan die Vertiefung im Ofen mit Platten aus Magnesia und dahinter liegenden Kohlenplatten aus. Ein solcher Ofen gestattete natürlich nur immer mit einer begrenzten Menge von Substanz zu arbeiten. Es werden aber jetzt von derselben Firma auch elektrische Öfen herge-

stellt, welche einen kontinuierlichen Betrieb gestatten. So zeigt z. B. Fig. 521 den Durchschnitt eines solchen Ofens. Der Tiegel A besteht entweder aus Kohle, wobei er zugleich als negative Elektrode dient, oder er besteht aus Magnesit, und dann wird der Strom durch einen Kohlenstab, der durch ein Loch in dem Tiegelboden geht, in diesen eingeführt. Bei F befindet sich die Klemme für das negative Stromkabel. Die positive Kohle B, die bei E mit dem positiven Kabel verbunden wird, kann durch die Schraube D gehoben oder gesenkt werden. Durch den Falltrichter C mit beweglichem Boden kann das zu verarbeitende Material nachgefüllt werden, während durch die Abstichöffnung bei K das geschmolzene Material entfernt werden kann. Etwaige Gase, die sich bei dem Prozeß bilden, entweichen durch die Öffnung G nach H.

Fig. 521.



In solchen Öfen gelingt es, eine große Reihe von Körpern im reinen Zustand in großen Quantitäten herzustellen, Chrom, Mangan, Molybdän, Wolfram, Uran, Vanadin, Zirkon, Titan, und ebenso deren Verbindungen zu studieren. Auch die Herstellung künstlicher Diamanten, allerdings in kleinen Quantitäten, war dadurch möglich.

Von besonderer Wichtigkeit, sowohl in theoretischer wie in praktischer Hinsicht, war die aus diesen Versuchen fließende Kenntnis, daß sich bei diesen Temperaturen die meisten Metalle mit dem Kohlenstoff zu neuen Körpern chemisch verbinden. Diese Verbindungen nennt man allgemein Karbide, und Moissan stellte so Karbide von Lithium, Calcium, Baryum, Strontium, Cer, Lanthan, Yttrium, Thorium, Aluminium, Mangan, Uran, Silizium, Bor dar. Hervorragende praktische Wichtigkeit haben bisher nur erstens das Siliziumkarbid (Karborundum) erlangt, welches härter als alle anderen Körper ist und nur vom Diamanten wenig übertroffen wird und welches daher zum Schleifen der Körper vielfach Verwendung findet, vor allem aber zweitens das Calciumkarbid, welches man jetzt auch gewöhnlich, ohne nähere Bezeichnung, Karbid nennt. Bringt man nämlich ein Gemenge von Kalk (CaO) und Kohle (C) in solchem Verhältnis in den elektrischen Ofen, daß auf je 1 Molekül CaO (56 g) 3 Moleküle Kohlenstoff (36 g) kommen, so verbindet sich das Calcium mit dem Kohlenstoff zu Calciumkarbid (CaC_2) und es entweicht Kohlenoxyd (CO). Das entstehende Karbid ist eine dunkle, homogene Masse, die sich leicht spalten läßt. Die hervorragende Bedeutung des Calciumkarbids besteht darin, daß, wenn man es in Wasser bringt, sich sofort ein Gas, Acetylen, bildet und zwar reines Acetylen, wenn das Calciumkarbid rein ist. Es verbindet sich nämlich der Kohlenstoff (C_2) mit dem Wasserstoff des Wassers (H_2) zu Acetylen (C_2H_2) und das Calcium (Ca)

des Karbids mit dem Sauerstoff (O) des Wassers zu Kalk (CaO). Das Acetylen, ein Kohlenwasserstoff, ist nun brennbar, und zwar brennt es mit viel hellerer Flamme als Leuchtgas. Da nun das Karbid ein fester, leicht transportabler Körper, und da die Reaktion mit Wasser eine so einfache ist, so beginnt jetzt in manchen Fällen eine neue Beleuchtungsart sich einzubürgern, nämlich die Beleuchtung mit Acetylengas, statt mit Leuchtgas. Eine Reihe von Unglücksfällen, die im Anfang bei dieser Acetylenbeleuchtung vorgekommen sind, hat zu genauerer Untersuchung der dabei vorhandenen Umstände geführt, und es wurde festgestellt, daß wenn das Acetylen unter einem Drucke steht, der den der Atmosphäre nur wenig übersteigt, daß es dann vollkommen gefahrlos ist, während es allerdings bei höheren Drucken zu sehr gefährlichen Explosionen Anlaß gibt. Die Acetylenindustrie, die sich in den letzten Jahren ziemlich ausbreitet, ist direkt aus der Elektrochemie hervorgegangen, insofern diese das Calciumkarbid auf einfache Weise und mit sehr großer Ausbeute liefert. Mit 1 Pferdekraft kann man in 24 Stunden 3,5 Kilo Karbid gewinnen. Das Karbid dient nicht bloß zur Acetylenerzeugung und dadurch für Beleuchtungszwecke, sondern es findet auch Anwendung für die Darstellung von Cyaniden, das sind Stickstoffverbindungen, die sich als Düngemittel eignen, ferner zur technischen Gewinnung von Ruß und wird aus diesen Gründen in großen Mengen hergestellt.

Aber mit dieser Darstellung von reinen Metallen oder Metalllegierungen sind die Möglichkeiten, wie man die elektrolytischen Wirkungen des Stromes benutzen kann, noch lange nicht erschöpft. Da bei jedem elektrolytischen Prozeß an der Kathode reduzierende, an der Anode oxydierende Stoffe entstehen, so kann man in sehr vielfältiger Kombination aus den elektrolysierten Substanzen neue bilden, welche von höherem Werte sind als die Ausgangsmaterialien. Es kommt eben nur darauf an, ob die Oxydationen und Reduktionen durch Vermittlung des Stromes billiger zu erzeugen sind, als durch rein chemische Oxydations- und Reduktionsmittel. Bisher hat sich schon in einer Reihe von Fällen das elektrolytische Verfahren billiger erwiesen, als andere rein chemische Verfahren, und dazu kommt noch der große Vorzug, daß man auf elektrischem Wege die Substanzen reiner erhält als auf anderen Wegen. In einer großen Anzahl von chemischen Fabriken Deutschlands und des Auslandes sind viele Zehntausende von Pferdekräften jetzt zur Erzeugung solcher chemischen Produkte mit Hilfe des elektrischen Stromes in Betrieb.

Da indes diese Verfahren, soweit sie wirklich praktisch benutzt werden, sehr geheim gehalten werden und eine Reihe von speziellen chemischen Kenntnissen voraussetzen, so sollen sie hier nicht näher angeführt werden.

Dagegen soll kurz das elektrolytische Bleichverfahren besprochen werden, welches zum Bleichen von Papier und Textilstoffen aller Art benutzt wird. Bei diesem Verfahren handelt es sich nur darum, eine Bleichflüssigkeit herzustellen. Mit dieser Flüssigkeit werden dann die Stoffe ebenso behandelt, wie z. B. mit einer bleichenden Chlorkalklösung. Um die Bleichflüssigkeit zu erzeugen, wird eine Kochsalzlösung elektrolysiert. Die Lösung wird in passende Gefäße gebracht, die man Elektrolyser nennt, und es wird ihr durch Elektroden, welche aus

Platin oder Platiniridium bestehen, der Strom zugeführt. Die chemischen Prozesse, die beim Stromdurchgang durch einen solchen Elektrolyser stattfinden, sind ziemlich kompliziert und noch nicht genau aufgeklärt. Für die Verwendung ist allein wichtig, daß sich in der Flüssigkeit Verbindungen von Chlor und Sauerstoff bilden, nämlich Chlorsäure (ClO_3) und chlorige Säure (ClO_2), welche sehr brauchbare bleichende Eigenschaften haben. Sie geben nämlich ihren Sauerstoff an den Farbstoff der zu bleichenden Pflanzenfasern ab und bleichen diese.

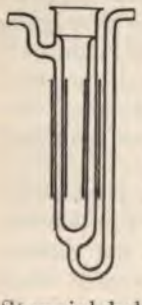
In einem solchen Elektrolyser, der 30 Kilo Kochsalz enthält und durch einen Strom von 100 Volt und 25 Ampere betrieben wird, wird pro Stunde so viel Bleichflüssigkeit erzeugt, als $^1/_2$ Kilo bleichendem Chlor entspricht. Die Salzlösung wird so verdünnt genommen, daß die Bleichflüssigkeit nur $1^1/_2$ bis 2 Promille an wirksamem Chlor enthält. Die bleichende Wirkung einer derartigen Flüssigkeit ist so groß, daß dieser Prozeß an vielen Stellen praktisch eingeführt ist.

Solche Anwendungen des elektrischen Stromes dürften sich in Zukunft noch viele ergeben, wenn in diese neue Technik erst genügend erfindungsreiche Kräfte eingetreten sein werden, die sowohl in elektrischer wie namentlich in chemischer Denkweise sich gleich sicher bewegen können.

Eine ganz abweichende elektrische Erzeugungsweise wird endlich für ein chemisches Produkt angewendet, welches für sehr verschiedene Zwecke sich als vorteilhaft erweist, nämlich für das Ozon. Ozon ist bekanntlich eine Modifikation des Sauerstoffs, von der die Chemiker annehmen, daß sie darin besteht, daß in einem Ozonmolekül 3 Atome Sauerstoff miteinander verbunden sind, während in einem gewöhnlichen Sauerstoffmolekül nur zwei derselben in Verbindung treten. Das dritte Sauerstoffatom des Ozons aber ist verhältnismäßig schwach gebunden und trennt sich daher leicht von dem Molekül, so daß Ozon infolgedessen starke oxydierende Wirkung besitzt.

Immer wenn eine elektrische Entladung, sei es ein Funke oder eine Glimmentladung, durch die Luft oder durch Sauerstoff geht, bildet sich Ozon, welches an seinem eigentümlichen Geruch leicht erkannt wird. Man bemerkt den Ozongeruch immer, wenn man aus Influenzmaschinen Funken zieht, ebenso bei dem Arbeiten mit Induktionsapparaten. Sehr intensiv tritt der Ozongeruch insbesondere bei den Versuchen nach der Teslaschen Anordnung auf, von denen S. 283 f. die Rede war. Aber sogar auch in der Nähe von Radium wird die Luft ozonisiert. Einen Apparat, um Ozon in verhältnismäßig großen Mengen zu erzeugen, hat W. Siemens bereits 1857 unter dem Namen Ozonröhre konstruiert. Dieselbe besteht, wie Fig. 522 zeigt, aus zwei ineinander gesteckten und oben zusammengeschmolzenen Glasröhren, von denen die äußere ein Zufluß- und ein Abflußrohr für die Luft resp. den Sauerstoff hat. Die innere Glasröhre ist innen, die äußere außen mit Stanniol belegt, so daß man einen Kondensator hat, dessen Belegungen das Stanniol, dessen dielektrische Zwischenschicht die Glaswände und die Luft sind. Ladet man die Belegungen des Kondensators durch rasch wechselnde Ströme von hoher Spannung, so wird in der Luft Ozon

Fig. 522.



erzeugt. Es hat sich nämlich gezeigt, daß das Ozon in größerer Menge erzeugt wird, wenn nur dunkle Entladungen durch die Luft hindurchgehen, als wenn wirklich Funken durch sie hindurchschlagen. Solche Ozonröhren haben sich sehr gut bewährt, so daß auch heute noch von Siemens & Halske die Ozonerzeugung durch derartige Röhren ausgeführt wird. Nur werden an die beiden Glasröhren nicht mehr die leitenden Belegungen aufgeklebt, sondern es wird vielmehr das innere Rohr mit Wasser gefüllt und das äußere in Wasser gestellt, so daß das Wasser selbst die Belegungen bildet.

Das Ozon hat einige Anwendungen zunächst zur Sterilisierung von Trinkwasser, ferner in der Bleicherei zum Bleichen von Leinengarnen und Tuchen erfahren und hat sich auch als wichtig erwiesen zur Reinigung von Stoffen, namentlich von Stärkederivaten, so daß man Stärke, Dextrin, Kristallgummi in vorzüglicher Reinheit mittels Ozon herstellen kann. Andere Benutzungen des Ozons, wie zum künstlichen Altern von Holz, von Weinen und Spirituosen, zur Vernichtung der Reblaus, sind noch nicht, oder nur zum Teil, in die Praxis übergegangen.

So hat sich gezeigt, daß in diesem noch jungen Gebiet der Elektrochemie bereits eine sehr große Anzahl von technisch und kommerziell höchst wichtigen Errungenschaften gewonnen worden sind, und der Ausspruch Werner Siemens', der an den Anfang dieses Kapitels gestellt wurde, hat sich zum Teil schon erfüllt, und seine weiteren Voraussagungen für die Zukunft werden voraussichtlich sich auch als richtig erweisen.

12. Kapitel.

Die Galvanoplastik.

Die wunderbare Eigenschaft des elektrischen Stromes, daß er flüssige Leiter, Elektrolyte, bei seinem Durchgang in ihre Bestandteile zerlegt, und daß diese Bestandteile an den Elektroden frei auftreten, führte schon im Jahre 1837 Jacobi dazu, darauf eine Methode zum Überziehen von Körpern mit Metallen zu gründen. Dadurch gab er den Anstoß zu der Galvanoplastik, der Kunst, auf galvanischem Wege Metallniederschläge auf den Oberflächen von Körpern hervorzubringen, und seit dieser Zeit hat sich die Galvanoplastik zu einem bedeutenden Industriezweig ausgebildet und immer neue Aufgaben in ihre Domäne gezogen.

Jede Lösung eines Metallsalzes, z. B. eine Kupfervitriollösung, wird durch einen elektrischen Strom, wie wir wissen (S. 129 f.), elektrolysiert, und es scheidet sich das Metall an der negativen Elektrode ab, der übrige Bestandteil, der die Säure enthält, an der positiven Elektrode. Besteht die positive Elektrode aus demselben Metall, welches in dem gelösten Salz enthalten ist, so wird für jedes Äquivalent des Metalls, das sich an der negativen Elektrode abscheidet, ein Äquivalent desselben Metalls von der positiven Elektrode aufgelöst, die Flüssigkeit bleibt also immer gleich konzentriert, und es findet nur an der positiven Elektrode eine Auflösung des Metalls, an der negativen ein Niederschlagen desselben Metalls statt.

Auf diese Weise kann man also die negative Elektrode mit einer Schicht eines Metalls überziehen, und je nach dem Metallsalz, das man anwendet, kann man Gegenstände verkupfern, vernickeln, vergolden, verzinnen, verplatinieren, verstählen. Jedoch eignet sich nicht jedes Metallsalz gleich gut, um solche galvanoplastische Niederschläge zu liefern, es haben sich im Gegenteil durch die Erfahrung für die verschiedenen Metallniederschläge bestimmte Salze und bestimmte Konzentrationen der Lösungen als besonders zweckmäßig erwiesen. Im allgemeinen nämlich sind es nicht die direkten Produkte der Elektrolyse, welche schöne Metallniederschläge ergeben, sondern vielmehr die durch sekundäre Prozesse erzeugten. Es werden daher gewöhnlich Doppelsalze angewendet, aus welchen das gewünschte Metall nicht durch den Strom direkt ausgeschieden wird, sondern erst dadurch, daß das wirkliche Kation es aus seiner Verbindung chemisch verdrängt. Doch ist dabei noch immer die Konzentration der Flüssigkeit, aus welcher das Metall niedergeschlagen werden soll, des Bades, von wesentlichem Einfluß auf die Schönheit des Niederschlags, und es haben darin die einzelnen Fabriken ihre besonderen Geheimnisse. Ebenso ist auch bei der Galvanoplastik, wie bei der eigentlichen Elektrochemie, die passende

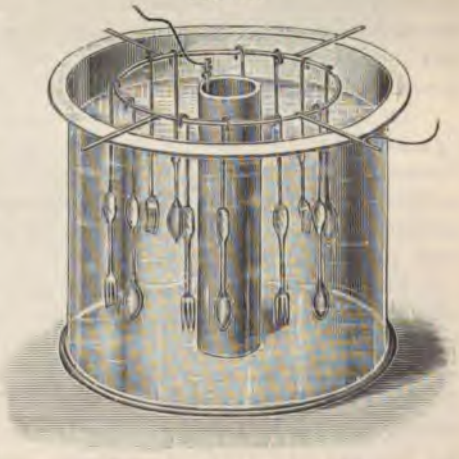
Stromdichte (S. 563) für jeden Prozeß besonders zu bestimmen. Zu große Stromdichten machen häufig die Metallniederschläge rauh und brüchig, zu kleine machen sie oft schwammig. Man muß also zur richtigen Führung jedes galvanoplastischen Prozesses die Stromstärke im Verhältnis zur Oberfläche der Kathode richtig wählen.

Zwei Aufgaben lassen sich sofort bei der Galvanoplastik unterscheiden. Die eine Aufgabe besteht darin, gewisse Gegenstände mit einem dünneren oder dickeren Überzug eines Metalles, z. B. Gold, zu versehen, so daß der Überzug auf ihnen haften bleibt. Das ist die Aufgabe der sogenannten Galvanostegie. Die zweite Aufgabe ist die, Gegenstände, z. B. Gipsmedaillen, mit einer dickeren Schicht eines Metalls zu überziehen, so daß man diese Schicht von ihnen abnehmen kann und dadurch einen Abdruck des ursprünglichen Gegenstandes erhält. Dies ist die Aufgabe der Galvanoplastik im eigentlichen Sinne. Beide Aufgaben sind nur durch ihre Benutzung verschieden, ihre Lösung auf galvanischem Wege ist dieselbe.

Wenn ein leitender Körper, also gewöhnlich ein Metall, mit einem galvanoplastischen Überzug versehen werden soll, der auf ihm haften soll, so ist es vor allen Dingen nötig, die Oberfläche des Metalles ganz von allen Verunreinigungen zu befreien, oder, wie man sagt, zu dekapieren. Diese Dekapierung kann bei manchen Metallen dadurch geschehen, daß man sie in Säuren eintaucht, also auf chemischem Wege, bei anderen muß man auf mechanischem Wege durch Bürsten und Reiben dieselbe zu bewerkstelligen suchen.

Es werden dann die zu überziehenden Gegenstände, also z. B. Löffel und Messer und Gabeln, alle zusammen in das Bad getaucht, z. B. in ein Silberbad, und alle parallel miteinander verbunden, also etwa alle an einen Metallstab leitend angehängt, der mit der negativen Elektrode der Stromquelle verbunden ist. Ein solches Bad zeigt z. B. Fig. 523. Oben auf dem hohen Glasgefäß befindet sich in der Mitte ein Ring von Messing, der durch vier Stäbchen auf dem Rand des Gefäßes aufsitzt. An dem Ring hängen alle zu versilbernden Gegenstände, und sie sind durch den Ring alle mit der negativen Elektrode der Batterie verbunden. Als positive Elektrode steht in diesem Falle ein zylinderförmiges Silberblech in der Mitte des Bades, damit alle Gegenstände möglichst gleichmäßig stark versilbert werden.

Fig. 523.



Die als negative Elektrode dienenden Gegenstände überziehen sich dann mit einer Schicht von Silber, die sich ganz genau der Form der Gegenstände anschließt und um so dicker wird, je länger man den Strom durch-

fließen läßt. Die Gleichmäßigkeit des Überzugs wird noch dadurch befördert, daß man die Gegenstände von Zeit zu Zeit umkehrt.

Größere Bäder werden aus Kästen hergestellt, die entweder aus emailliertem Gußeisen oder Steinzeug, oder bei sauren Bädern aus Holz gemacht werden, welches innen mit Blei ausgeschlagen oder mit Pech bestrichen wird.

Ein solches größeres Bad ist in Fig. 524 abgebildet. Es besteht aus einer Steinzeugwanne, auf deren oberem Rand fünf voneinander isolierte Messingstäbe liegen. Der erste, dritte und fünfte Stab sind links, der zweite und vierte rechts miteinander verbunden und die linke Seite wird mit dem positiven Pol der Batterie, die rechte mit dem negativen in Verbindung gesetzt. An die mit dem negativen Pol verbundenen Stäbe werden die galvanoplastisch zu überziehenden, etwa zu verkupfernden Gegenstände, an die anderen in diesem Fall Kupferbleche oder Bleche aus dem gewünschten anderen Metall angehängt. Da die zu überziehenden Gegenstände mitten zwischen den Metallplatten hängen, so werden sie gleichmäßig überzogen. Auch hier wird die Gleichmäßigkeit wieder durch zeitweiliges Umhängen befördert. Da man ferner auch in diesem Gebiet jetzt das Hauptaugenmerk auf quantitative Messungen von Stromstärke und Spannung legt, um immer genau unter den besten Bedingungen zu arbeiten, so schaltet man parallel zu den Enden des Bades ein Voltmeter ein und in die Leitung zum Bade einen Regulierwiderstand. Man sieht in der Figur oben die zwei Hauptleitungen von der Batterie oder Dynamomaschine. An diese ist das Bad angeschlossen unter Zwischenschaltung eines Regulierwiderstandes. Das Voltmeter mißt die Spannung des Bades.

Die Vorschriften für die einzelnen Metallbäder, die öffentlich bekannt sind, sind nicht immer diejenigen, nach denen die Fabriken auch wirklich arbeiten. Vielmehr haben diese zum Teil geheime Verfahren, die sich allmählich als vorteilhaft herausgestellt haben. Indessen sollen hier einige Zusammensetzungen von Bädern angeführt werden, nach denen man sicher arbeiten kann.

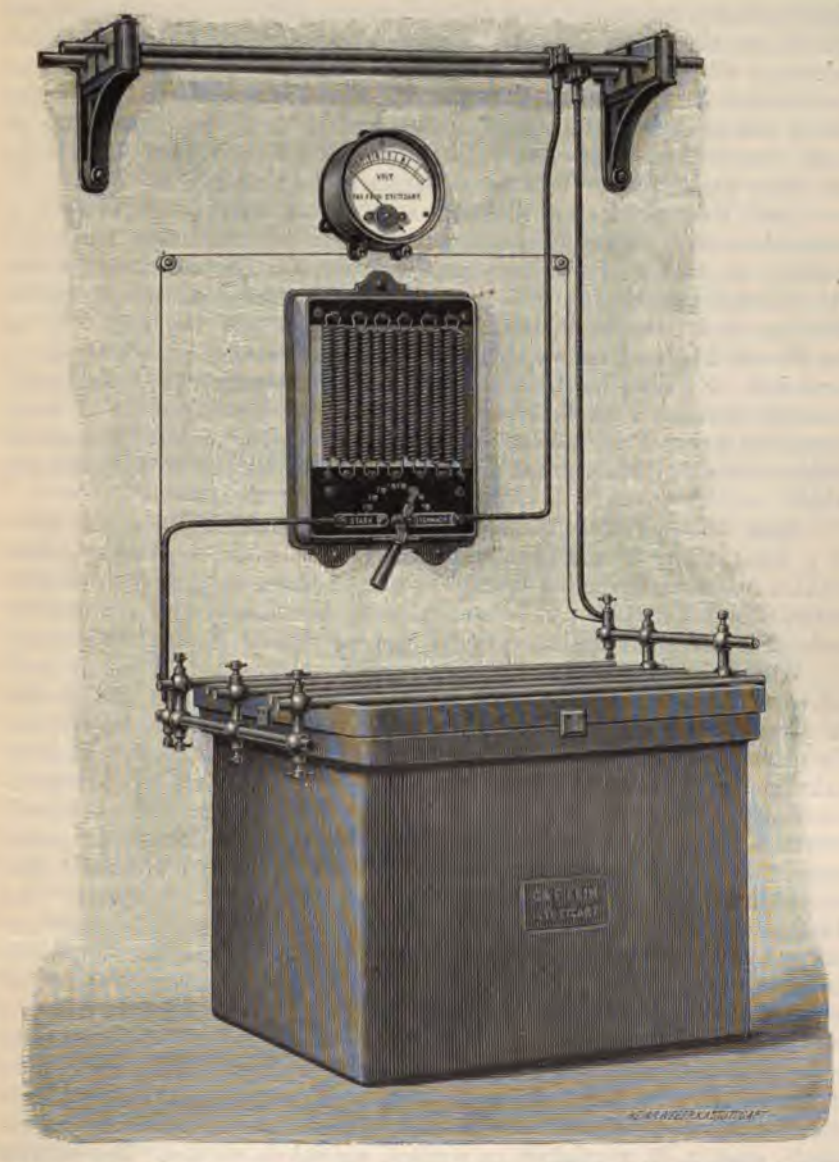
Das Bad zur Versilberung besteht aus einer Lösung von Cyansilberkalium, welche man in der für die Versilberung passenden Zusammensetzung erhält, wenn man in 1 l Wasser 12 g reines Cyankalium auflöst und dazu 46 g Kaliumsilbercyanid gibt, welches sich ebenfalls auflöst. Die passende Stromdichte für guten Silberniederschlag ist 0,5 Ampere pro Quadratdezimeter.

Zum Verkupfern nimmt man gewöhnlich eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol) oder eine Lösung von Cyankupferkalium, letztere namentlich bei der Verkupferung von Eisen- und Zinkgegenständen. Die letztere enthält auf 100 l Wasser 1,7 kg Soda, 2,5 kg doppeltschwefelsaures Natron, 2 kg essigsaures Kupfer (kristallisiert) und 2,0 kg Cyankalium. Die passende Stromdichte ist dabei etwa 0,4 Ampere pro Quadratdezimeter, während sie bei dem Kupfervitriolbad sehr viel größer sein kann, bis ca. 3 Ampere pro Quadratdezimeter.

Zum Vergolden braucht man am vorteilhaftesten eine Lösung von Cyangoldkalium. Es wird als passendes Goldbad empfohlen eine Lösung, welche in 10 l Wasser 10 g Cyankali, 500 g phosphorsaures Natron, 150 g doppeltschwefelsaures Natron und 15 g Chlorgold enthält. Das

Bad wird bei 50° angewendet und pro Quadratdezimeter 0,2 Ampere benutzt. Besondere Formen der Vergoldung sind die sogenannte grüne

Fig. 524.



und rote Vergoldung, bei welcher der Goldüberzug nicht aus reinem Gold besteht, sondern aus Gold, welches mit Silber, resp. Kupfer versetzt ist. Es ist sehr schwierig, die richtige Zusammensetzung des Bades zu finden, aus welchem grünes oder rotes Gold von gewünschter

Nüance abgeschieden wird. Man läßt deshalb den Strom selbst die richtige Zusammensetzung bereiten. In ein gewöhnliches (braunes) Goldbad, in welchem das zu überziehende Metall als negative Elektrode hängt, taucht man als positive Elektrode eine reine Silberplatte. Diese löst sich durch den Strom auf, und dadurch ändert sich die Zusammensetzung des Bades allmählich und der Niederschlag auf dem negativen Metall bekommt allmählich die grüne Farbe. Sobald die gewünschte Nüance da ist, wird der Strom unterbrochen und nun als positive Elektrode eine Platte aus grünem Gold hineingehängt, welche dann den Prozeß bis zu Ende durchführt. Dasselbe Verfahren wird bei der roten Vergoldung mit einer Kupferplatte statt der Silberplatte angewendet.

Zum Vernickeln nimmt man ein Bad, welches pro Liter 70 g schwefelsaures Nickeloxydulammoniak enthält, also mit dem Nickelsalz gesättigt ist, ferner 25 g Ammoniumsulfat und 5 g Zitronensäure enthält. Die Stromdichte ist 0,5—0,7 Ampere pro Quadratdezimeter. Nickelüberzüge sind namentlich bei Eisengegenständen sehr wertvoll, weil sie das Rosten hindern. Auch Messinggegenstände werden jetzt sehr häufig vernickelt. Zu einer haltbaren Vernicklung gehört unbedingt vollständige Reinheit der zu behandelnden Flächen. Zum Vernickeln muß man, wegen der hohen Polarisation, eine größere Spannung als für die anderen Bäder anwenden, nämlich so, daß man an jedem Nickelbad 4 Volt Spannung erhält.

Zum Verstählen benutzt man ein Bad, welches pro Liter 30 g Eisensulfat, 30 g Eisenalaun und 90 g Salmiak, in Wasser gelöst, enthält. Die Stromdichte beträgt nur 0,02 Ampere pro Quadratdezimeter. Zum Verstählen von Druckplatten, von denen weiter unten die Rede sein wird, nimmt man Bäder aus säurefreier Eisenchlorürlösung.

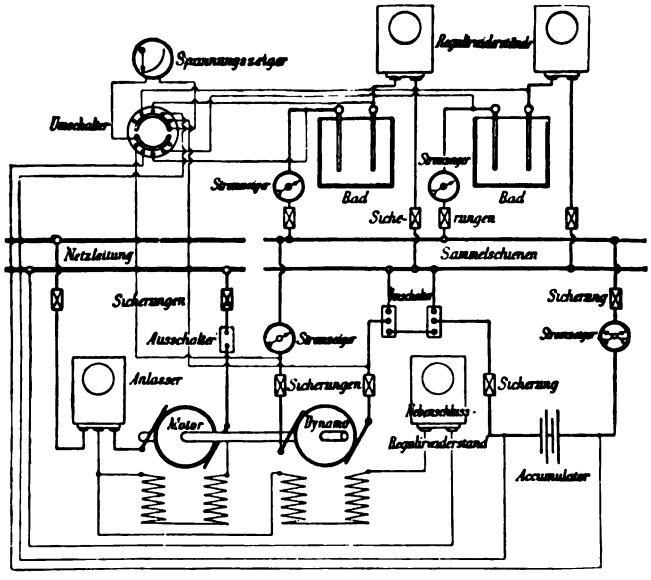
Während man früher für diese galvanoplastischen Arbeiten stets sich der galvanischen Elemente bediente und infolgedessen bei großen Fabriken eine sehr große Anzahl derselben benutzen mußte, ist seit der Einführung der Dynamomaschine auch in diesem Zweig der Elektrotechnik ein Umschwung eingetreten. Man kann natürlich jede Dynamomaschine, welche gleichgerichtete Ströme liefert, zur Galvanoplastik benutzen. Die galvanoplastischen Bäder sind jedoch immer so große, ausgedehnte Flüssigkeitsmengen, daß ihr galvanischer Widerstand fast verschwindend ist. Es ist also für galvanoplastische Zwecke zwar eine Maschine nötig, welche einen starken Strom liefert, aber sie braucht nur geringe elektromotorische Kraft zu haben. Es werden daher die Maschinen für galvanoplastische Zwecke mit sehr geringem inneren Widerstand gebaut und zwar wendet man immer Nebenschlußmaschinen an. Es kommt ja für die Galvanoplastik wesentlich darauf an, daß stets derjenige Pol, welcher mit den zu überziehenden Gegenständen verbunden ist, der negative Pol bleibt, daß nicht etwa die Elektromagnete der Dynamomaschine ihre Polarität während des Betriebes umkehren und so die Gegenstände, statt z. B. vernickelt zu werden, entnickelt werden. Ein solches Umkehren kann aber bei Hauptstrommaschinen leicht eintreten, wenn Anker, Magnete und Bad hintereinandergeschaltet werden. Bei der Elektrolyse entsteht ja immer Polarisation und also auch ein Polarisationsstrom, welcher dem Maschinenstrom entgegenwirkt (s. S. 150 f.). Wenn

also z. B. während des Betriebes die Geschwindigkeit der Maschine plötzlich abnimmt, etwa durch eine momentane Störung des Motors, so überwiegt der Polarisationsstrom, es fließt also ein Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Maschine, und die Pole der Elektromagnete werden umgekehrt. Kommt die Dynamomaschine wieder in richtigen Gang, so bleiben doch die Pole der Elektromagnete umgekehrt, weil eine Dynamomaschine ja nur den vorhandenen Magnetismus ihrer Eisenteile verstärkt. Der Strom der Maschine hat also nun die entgegengesetzte Richtung wie früher; der vorher negative Pol wird jetzt positiver Pol. Alle die Niederschläge auf den Gegenständen im Bade werden also nun wieder aufgelöst.

Auf sehr einfache Weise wird diese Gefahr durch die Nebenschaltung der Elektromagnete beseitigt, wie wir bereits S. 416 gesehen haben, wo erwähnt wurde, daß zum Laden von Akkumulatoren ebenfalls Nebenschlußdynamos und aus demselben Grunde gewählt werden.

Will man in Orten, in welchen durch elektrische Zentralen Strom verteilt wird, eine galvanoplastische Einrichtung betreiben, so hat man gewöhnlich mit der Schwierigkeit zu rechnen, daß die Spannung des Stromes, wie ihn die Zentralen liefern, eine sehr hohe ist, 100 bis 250 Volt, während man zum Betrieb der Bäder nur Spannungen von 3 bis 6 Volt braucht. In diesem Falle kann man sich derart helfen, daß man von dem Strom der Zentrale zunächst einen Elektromotor treiben läßt und daß man von diesem erst eine passende Dynamomaschine, die Ströme von wenigen Volt Spannung, aber hoher Stromstärke zu liefern im stande ist, antreibt. Man benutzt also dann einen Gleichstromumformer (S. 434), welcher die hohe Spannung in niedrige verwandelt. In diesem Falle schaltet man auch gewöhnlich noch parallel zur Dynamomaschine einige Akkumulatoren, damit diese im Falle, daß keine Bedienung für den Motor vorhanden ist, die Stromlieferung übernehmen. Eine Schaltung für diesen häufig vorkommenden Fall, bei dem zwei parallel geschaltete Bäder von der Netzleitung der Zentrale aus indirekt mit Strom versorgt werden sollen, zeigt Fig. 525,

Fig. 525.



eine Schaltung, die kompliziert aussieht, aber leicht zu verstehen ist. Der Strom von der Zentrale kommt in die beiden Leitungen links, die als Netzleitung bezeichnet sind. Von der einen Schiene dieser Leitung geht der Strom durch eine Sicherung und einen Anlasser (Widerstand) zu dem Elektromotor, der als Nebenschlußmotor gezeichnet ist, und geht von dessen rechter Bürste durch einen Ausschalter und eine Sicherung zur anderen Netzschiene. Der Motor kommt in Rotation und treibt die mit ihm direkt gekuppelte oder durch Riemen mit ihm verbundene Dynamomaschine, die ebenfalls eine Nebenschlußmaschine ist. Der Nebenschluß derselben (die Magnete) wird durch einen Regulierwiderstand direkt von der Netzleitung gespeist. Von den Bürsten dieser Dynamo gehen die Leitungen durch Sicherungen und Stromzeiger zu den zwei Schienen rechts, die als Sammelschienen bezeichnet sind. Es kann aber auch durch den Umschalter der Strom dieser Dynamo erst in den Akkumulator geleitet werden und dann zur Schiene, oder es kann der Strom vom Akkumulator direkt in die Schienen geleitet werden. An die Sammelschienen, die also, wie gesagt, wenige Volt Spannung haben, sind nun die beiden Bäder oben parallel geschaltet und jedes ist mit einem Regulierwiderstand versehen. Durch besondere Drähte, die zu dem Umschalter und Spannungszeiger (Voltmeter) links oben führen, kann man die Spannung jedes einzelnen Teiles der Dynamomaschine oder des Akkumulators oder jedes der beiden Bäder messen.

Mit starken Strömen ist es nun möglich, in kurzer Zeit beliebig große Mengen von Gegenständen mit Niederschlägen von Metallen zu versehen, und diese Niederschläge können mit einiger Sorgfalt so gleichmäßig gemacht werden, daß sie den feinsten Konturen des Gegenstandes sich anschmiegen. Wenn der galvanische Niederschlag, wie es beim Vergolden, Versilbern, Vernickeln fast stets verlangt wird, fest auf dem Gegenstand haften soll, so muß dessen Oberfläche, wie schon erwähnt, vollständig rein sein, sie muß dekapiert werden. Die geringste Spur von Fett auf einem Körper läßt den galvanischen Niederschlag nicht fest auf ihm haften, sondern man kann ihn dann leicht ablösen. Dies ist namentlich beim Vernickeln zu beobachten. Gut haftende Nickelüberzüge können nur auf absolut reinen Flächen niedergeschlagen werden. Die Gegenstände, welche galvanisch überzogen sein sollen, müssen stets leitend sein, da sie ja als negative Elektroden in die Flüssigkeit tauchen müssen. Das Einfachste ist daher, auf Metallen galvanische Niederschläge hervorzubringen. Aber auch nicht leitende Körper kann man galvanoplastisch überziehen, wenn man bloß ihre Oberfläche leitend macht, wenn man sie, wie die galvanoplastische Technik es nennt, metallisiert. Das einfachste und gewöhnlich angewendete Mittel dazu ist das, die Oberfläche des betreffenden Körpers mit ganz feinem Graphitpulver einzureiben. Der Graphit ist ein Leiter der Elektrizität, er ist in äußerst feinen Zustand zu bringen und haftet leicht an Körpern, namentlich wenn sie nicht ganz eben und glatt sind. So kann man Gipsmedaillen oder -figuren, ebenso Figuren aus Holz, Alabaster, Marmor einfach durch Bestreichen mit Graphitpulver an der Oberfläche leitend machen. In anderen Fällen, wo der Graphit nicht haftet, z. B. bei Glas, Porzellan, Elfenbein und anderen, muß man erst den Gegenstand mit einer ganz dünnen Firnis-

schicht überziehen und, wenn diese beinahe trocken geworden ist, das Graphitpulver aufstreichen. Will man den galvanoplastischen Überzug von dem Gegenstand nachher leicht entfernen können, so muß man die Bürste, mit welcher man den Graphit aufstreicht, etwas mit Talg einfetten.

In manchen Fällen, namentlich bei sehr zarten Objekten, Früchten, Blumen u. s. w., läßt sich aber dieses Metallisieren mit Graphit nicht anwenden. Man kann dann aber auf chemischem Wege den Gegenstand mit einer ganz feinen leitenden Schicht versehen. Man braucht nur das Objekt mit einer Lösung von salpetersaurem Silber einzustreichen und kann dann durch Reduktion das Silber auf dem Objekt in einer sehr feinen Schicht niederschlagen. Das salpetersaure Silber löst sich in Wasser leicht, in warmem Alkohol zwar schwer, aber doch etwas. Mit dieser Lösung überstreicht man dann die Objekte (Blumen und Früchte z. B. mit einer alkoholischen Lösung), und wenn man sie dann dem Sonnenlicht aussetzt, so scheidet sich das Silber aus der Lösung in Form eines ganz feinen, schwarzen Pulvers auf der Oberfläche ab und macht diese nun leitend genug, um galvanoplastisch überzogen werden zu können.

Auf diese Weise kann man auf jedem beliebigen Körper einen galvanischen Überzug hervorbringen. Will man diesen Überzug nachher auch leicht wieder von dem Objekt trennen, will man Abdrücke des Gegenstandes haben, so muß man bewirken, daß der Überzug von vornherein nicht fest an dem Gegenstand haftet. Zu dem Zweck ist es nun notwendig, den Gegenstand vor dem Einhängen in das Bad an seiner Oberfläche einzufetten. Meistenteils und am leichtesten werden diese Abdrücke in Kupfer gemacht. Der leitende oder metallisierte Gegenstand wird, etwas gefettet, als negative Elektrode in eine Lösung von schwefelsaurem Kupfer gebracht, und wenn die niedergeschlagene Schicht eine gewisse Dicke erreicht hat, ist es leicht, sie einfach abzunehmen. So macht man von Kunstwerken, von Gipsfiguren, von Medaillen, Münzen galvanische Kupferabdrücke. Ja man kann sogar von Photographieen galvanische Abdrücke in Kupfer erhalten. Eine Daguerrotypplatte wird mit einer sehr verdünnten Lösung von Cyankali übergossen, abgewaschen und dann in das Bad gehängt. Wenn ein schwacher Strom 5 bis 8 Stunden hindurchgeflossen ist, so ist auf der Platte eine Kupferschicht vorhanden, welche sich leicht mit einem Messer ablösen läßt und welche die Photographie bis in die feinsten Details wiedergibt.

Galvanische Abformungen werden jetzt fast allein zur Reproduktion von Stahlstichen und Holzschnitten angewendet. Von einem Holzschnitt z. B. lassen sich nicht ohne Schaden sehr viele Abdrücke machen. Man verfertigt daher von einem solchen Holzschnitt, den man durch Graphit metallisiert, beliebig viele galvanische Abformungen, Klischees oder Galvanos genannt, und macht von jedem solchen Klischee nur so viele Abdrücke, als man scharf erhalten kann. Dabei ist eine Stromdichte von etwa 1 Ampere pro Quadratdezimeter anzuwenden. Dasselbe Verfahren wendet man oft bei Drucken, bei Schriftsätzen an, von welchen man, nachdem sie gesetzt sind, erst galvanische Klischees anfertigt, die man dann nur so oft benutzt, als sie scharfe Abdrücke geben. Um Kupferplatten, die durch viele Abdrücke sehr leiden, beliebig oft reproduzieren zu können, macht man auch galvanoplastische sogenannte Hochplatten

von ihnen (in denen die Zeichnung erhaben ist) und kann dann von den Hochplatten beliebig viele Klischees abnehmen. Oft macht man auch die Originalkupferplatte des Stichs dadurch widerstandsfähig, daß man sie galvanoplastisch mit einer dünnen Schicht Eisen überzieht, verstählt oder noch besser vernickelt. Dazu dienen Eisenchlorürbäder für die Verstählung und Bäder aus schwefelsaurem Nickeloxydul für die Vernickelung. Eine solche verstählte oder vernickelte Kupferstichplatte erlaubt eine sehr große Menge von Abdrücken. Man hat von verstählten Platten bis 15 000, von vernickelten bis 40 000 Abzüge in tadelloser Form erhalten können.

Während auf der negativen Elektrode das Metall aus der Lösung niedergeschlagen wird, wird die positive Elektrode aufgelöst. Auch diese Auflösung der positiven Elektrode läßt sich technisch verwerten, nämlich zum Gravieren der Metalle. Wenn man nämlich einzelne Teile der positiven Elektrode mit einer isolierenden Substanz, z. B. mit Lack oder Wachs, bedeckt, so werden diese Teile während des Stromdurchgangs nicht aufgelöst. Von den übrigen nicht bedeckten Teilen wird das Metall allmählich fortgenommen, sie werden vertieft, während die bedeckten Teile in der ursprünglichen Höhe bleiben. Man kann also das Metall der positiven Elektrode z. B. ganz mit Wachs überziehen und nur eine Zeichnung in das Wachs kratzen, so daß dort das Metall frei liegt, dann ist nach dem Durchgang des Stromes diese Zeichnung vertieft in dem Metall. Oder man kann auch das Muster ganz mit Wachs bedeckt halten und nur die übrige Fläche der Elektrode frei lassen, dann wird nach Durchgang des Stromes das Muster erhaben auf der Elektrode erscheinen. Die vertieften Muster kann man dann, nachdem sie dekapiert sind, galvanisch mit einem anderen Metall, Gold, Silber, Kupfer u. s. w., ausfüllen, so daß man eine vollständige Metallinkrustation erhält. Auf diese Weise werden häufig kunstgewerbliche Gegenstände hergestellt und oft auch Antiquitäten nachgemacht, wozu sich die Elektrizität eben auch hergeben muß.

13. Kapitel.

Die Telegraphie.

Zwei Eigenschaften waren es, welche in der Elektrizität schon sehr früh eine passende Kraft erkennen ließen, die zur Übertragung von Nachrichten auf weite Entfernungen geeignet wäre. Die erste dieser Eigenschaften ist die große Schnelligkeit, mit der sich der elektrische Zustand auf Leitern verbreitet. Die Geschwindigkeit, mit der die Elektrizität auf Leitern sich fortpflanzt, ist gleich der Lichtgeschwindigkeit, so daß alle Entfernungen, die wir auf der Erde haben, fast momentan von der Elektrizität durchflossen werden. Zu dieser ersten Eigenschaft kommt aber als zweite wichtige hinzu, daß der elektrische Strom sich in der Hauptsache nur auf vorgeschriebenen Wegen fortpflanzt. Der elektrische Strom fließt immer den Leitern entlang, die Elektrizität bleibt auf der Oberfläche von isolierten Leitern und nur bei ungenügender Isolation dringt sie in die isolierende Substanz ein. Das ist ein großer Vorzug, den der elektrische Strom vor dem Licht hat, welches sonst allein an Geschwindigkeit mit ihm konkurrieren kann. Das Licht verbreitet sich in der Luft und kann nicht durch Metalle gehen. Der elektrische Strom dagegen braucht zu seinem Wege leitende Körper, Metalle, und dringt nicht oder nur wenig in die begrenzende Luft ein. Daraus ergibt sich, daß man dem Licht, wenn man ihm seinen Weg vorschreiben will, vollkommen geradlinige Bahnen anweisen muß, während der elektrische Strom jeder Krümmung seiner Bahn folgt. Und nun übt die Elektrizität so verschiedenartige Wirkungen aus, läßt sie sich in so vielfacher Weise umwandeln, daß es leicht ist, an entfernten Stellen von einem Punkt aus durch sie gewisse Wirkungen hervorzubringen und dadurch verabredete Zeichen zu geben.

Jedoch die Bemühungen alle, die zuerst auf das telegraphische Senden von Nachrichten gerichtet waren, waren sehr unzweckmäßig, weil man für jeden Buchstaben, den man telegraphieren wollte, einen eigenen Draht anwenden wollte, so daß Napoleon I., als ihm der Plan eines derartigen Telegraphen vorgelegt wurde, ihn spöttisch als „idée germanique“ abwies. Erst seitdem man, durch G a u ß angeregt, einsah, daß alle unsere Buchstaben durch zwei Zeichen sich bequem ausdrücken lassen, konnte die Telegraphie dem praktischen Bedürfnis im großen entsprechen.

Diejenigen Wirkungen der Elektrizität, welche jetzt fast allein zum Telegraphieren benutzt werden, sind die elektromagnetischen, und zwar werden heute zum allgemeinen Verkehr nur solche telegraphischen Apparate benutzt, welche nicht vorübergehende, sondern bleibende Zeichen beim Telegraphieren geben, die S c h r e i b t e l e g r a p h e n. Sie beruhen auf der Anziehungswirkung, welche ein Elektromagnet auf seinen Anker ausübt. Doch ist bei diesen eine besondere Schrift nötig, welche erlernt

an der Achse befestigt, während die vordere Schiene V bei v mit dem einen Pol K der Batterie verbunden ist (die hintere Schiene N ist bei n durch den Telegraphenapparat der eigenen Station hindurch zur Erde E abgeleitet, was uns erst später interessiert), der andere Pol der Batterie ist auch zur Erde abgeleitet.

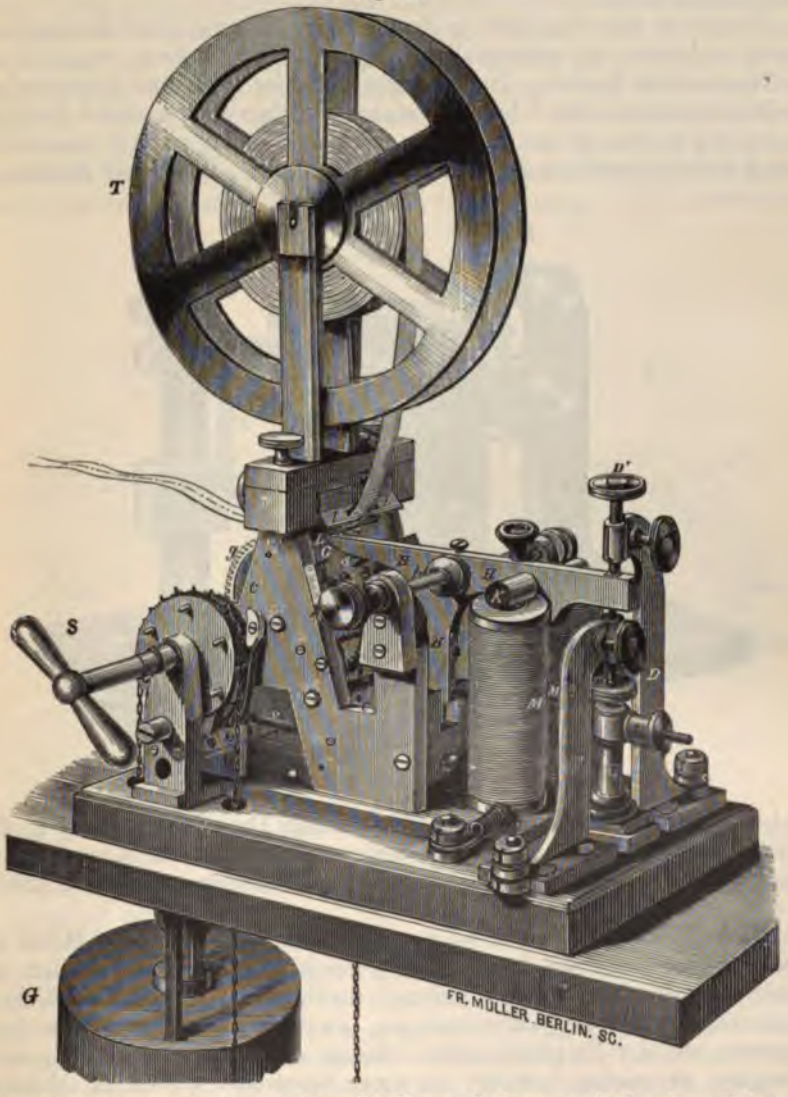
Steht der Schlüssel in der Aufgabestation in der gezeichneten Position, so fließt kein Strom von ihm durch die Leitung, denn bei a ist der Strom unterbrochen. Wird dagegen der Schlüssel heruntergedrückt, so geht der Strom von dem einen Pol K des Elementes durch v, a, α, b', B, d an die Leitung L und kommt dadurch an die zweite Station. Dort steht aber natürlich auch ein solcher Schlüssel, da ja beide Stationen ganz gleich eingerichtet sind, und daher kommt der Strom an das d des dortigen Schlüssels, der aber nicht heruntergedrückt ist, sondern in der gezeichneten Lage sich befindet. Folglich geht der Strom dort durch d, B, b, γ, c, n zum dortigen Apparat und von diesem zur Erde.

Auf diese Weise hat man es in der Hand, durch Herunterdrücken oder Nachlassen des Tasters den Strom von der einen Station nach der anderen zu schicken oder zu unterbrechen, und dieser Strom kann auf der Empfangsstation beliebige elektromagnetische Wirkungen hervorbringen. Soll also die Wirkung darin bestehen, wie es bei dem Morseschen Telegraphen der Fall ist, daß ein Elektromagnet durch den Strom erregt wird, so braucht man nur in die Leitung, welche in der Empfangsstation von n zur Erde führt, noch diesen Elektromagneten einzuschalten, um sofort die nötige Verbindung zu haben. Denn wenn in Fig. 526 der Schlüssel G der ersten Station heruntergedrückt wird, also von der ersten Station aus depeschiert wird, so geht der Strom durch die Leitung L nach dem Schlüssel der zweiten Station, dort durch d, B, b, γ, c, n *um den Elektromagneten* und dann zur Erdplatte. Es ist dann also durch diese Verbindung von der ersten Station aus der Elektromagnet in der zweiten erregt, während der der ersten Station, der auch zwischen n und der Erde sich befindet, selbst nicht von einem Strome durchflossen wird. Ebenso kann man von der zweiten Station aus durch Druck auf den Schlüssel den Elektromagneten der ersten erregen, ohne daß der eigene Elektromagnet beeinflußt wird.

An der Empfangsstation müssen also durch diese einzelnen Ströme, welche den Elektromagneten erregen, Zeichen gegeben werden. Dazu dient der eigentliche *Morseapparat*, welcher in einer älteren, aber übersichtlichen Form in Fig. 527 gezeichnet ist. Der Strom kommt in die Drahtwindungen des Elektromagnets M M. Über dessen Polen befindet sich der eiserne Anker K an einem Hebel H H, welcher an seinem äußersten Ende L eine Spitze trägt. Bei jeder Abwärtsbewegung des Ankers wird die Spitze in die Höhe gehoben und drückt in einen Papierstreifen, der sich an ihr vorbeibewegt, ein Zeichen ein. Ist der Strom nur ein ganz kurzer, so wird der Magnet nur momentan erregt, der Anker also nur momentan angezogen; dann macht die Spitze einen Punkt auf den Papierstreifen. Dauert der Strom etwas längere Zeit, so bewegt sich ein größeres Stück des Papiers an dem Stift vorbei und es erscheint ein Strich auf demselben. Aus Punkten und Strichen ist aber das Morsesche Alphabet zusammengesetzt. Damit der Anker nicht bis zur Berührung

mit dem Magneten angezogen wird, sind bei D und D' zwei Anschläge angebracht, welche die Bewegung des Hebels H begrenzen. In dieser einfachen Weise werden die Zeichen bei dem Morseschen Schreibapparat hervorgebracht. Das Papierband befindet sich aufgerollt auf einem Pa-

Fig. 527.

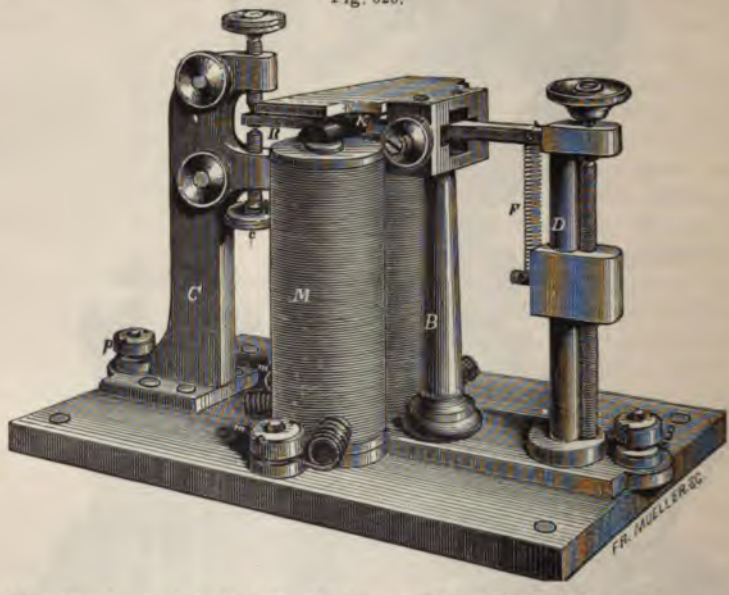


pierträger T und geht durch einen Schlitz zwischen zwei Messingstücken l l und dann zwischen zwei Walzen hindurch, welche aufeinander aufliegen. Die obere Walze wird durch ein Räderwerk gleichmäßig bewegt und nimmt durch Reibung die untere Walze und den Papierstreifen mit. Die Bewegung wird durch ein Gewicht G hervorgebracht, welches an einer

Kette über eine Rolle läuft und dann durch einige ineinander greifende Räder die obere Walze in Rotation bringt. Der Schlüssel S dient zum Aufziehen des Gewichtes, wenn es abgelaufen ist. Das Räderwerk ist es allein, welches diesen Morseschen Schreibapparat in seiner ursprünglichen Form kompliziert aussehen läßt, der im Prinzip und in der Benutzung höchst einfach ist.

Wenn nun zwei Stationen je einen Taster, Batterie und Schreibapparat haben, so können sie miteinander telegraphisch verkehren, wenn sie nur die Morseschrift kennen. Indes zeigte sich hier bald eine Schwierigkeit. Die Elektromagnete des Schreibapparates brauchen einen ziemlich kräftigen Strom, um überhaupt im stande zu sein, den Anker gehörig anzuziehen, so daß der Stift deutliche Zeichen eindrücken kann. Bei großer Entfernung

Fig. 528.

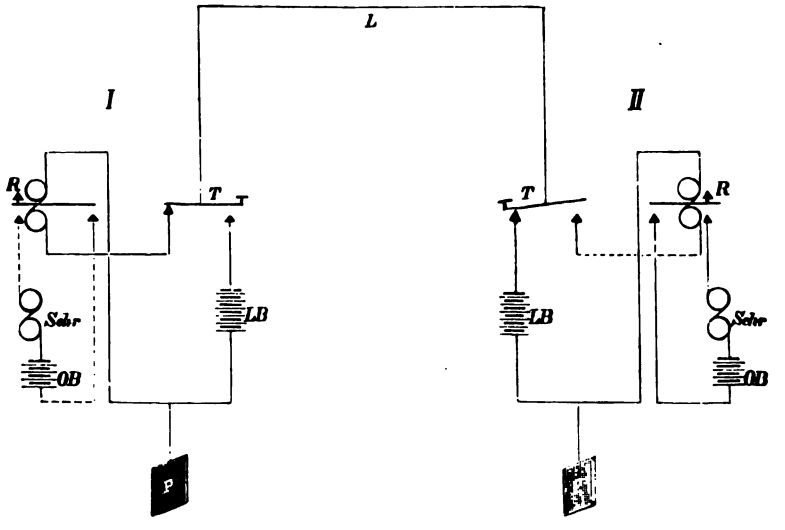


der beiden Stationen ist aber der Widerstand der Drahtleitung ein so großer, daß man schon eine sehr große Batterie von galvanischen Elementen anwenden müßte, um den Elektromagneten der entfernten Station kräftig zu erregen.

Deshalb hat Wheatstone zuerst ein sehr einfaches Mittel angegeben, welches diese Schwierigkeit beseitigt. Er läßt nämlich den Strom, der durch die ganze Leitung fließt, nicht direkt den Elektromagneten des Morseapparates erregen, sondern vielmehr einen anderen Magneten auf der Empfangsstation, dessen Anker nur eine ganz geringe Bewegung zu machen braucht, um einen besonderen Strom zu schließen, welcher dann seinerseits den Morseapparat in Tätigkeit bringt. Einen solchen Apparat nennt man ein Relais (Vorspann). In Fig. 528 ist die Abbildung eines solchen gegeben. Der Elektromagnet M desselben, der mit sehr vielen Umwindungen eines dünnen Drahtes umgeben ist, wird von dem Strom, der von der entfernten Station kommt, erregt, auch wenn

dieser sehr schwach ist, und zieht dadurch den Anker K ein wenig an. Dieser braucht aber nur eine ganz geringe Bewegung zu machen, um auf die Schraubenspitze R zu drücken und dadurch einen besonderen Strom zu schließen. Es wird nämlich an der Empfangsstation ein Strom einer besonderen Batterie bei g eingeleitet, geht durch die Säule D und den Anker K und, wenn K auf R aufliegt, durch R und C zur Klemmschraube p und dann durch den Morseapparat und zur Batterie zurück. Auf diese Weise erregt der Strom von der entfernten Station gar nicht den Morseapparat selbst, sondern stellt bloß einen Kontakt her, durch den eine besondere Batterie den Morsemagneten erregt. Hört der Linienstrom auf, so wird der Anker K durch eine Feder F von R wieder abgehoben. Durch diese Einrichtung des Relais ist also die große Schwierigkeit, die das Telegraphieren auf weite Entfernungen hat, beseitigt. Die schwächsten

Fig. 529.



Ströme genügen schon, um den Anker des Relais in eine geringe Bewegung zu bringen, und eine ganz geringe Verschiebung desselben genügt schon, um den Strom einer kräftigen Batterie zu schließen, die den Morseapparat in Tätigkeit bringt.

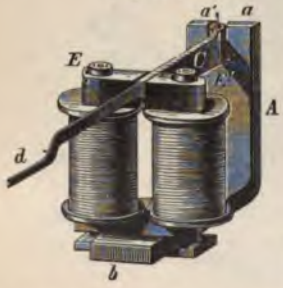
Bei der Anwendung eines Relais muß aber jede Station zwei verschiedene Batterieen haben, eine für den Strom nach der anderen Station, die sogenannte Linienbatterie, und eine für den eigenen Morseapparat, die Ortsbatterie. Wie zwei Stationen mit diesen Apparaten eingerichtet und verbunden sein müssen, ist aus Fig. 529 zu ersehen. Darin bedeutet *L B* die Linienbatterie, *O B* die Ortsbatterie, *Schr* den Morseschen Schreibapparat, R das Relais, T den Taster und P die Erdplatte. Wird z. B. auf der Station II der Taster heruntergedrückt, also telegraphiert, so geht der Strom von dem einen Pol der Linienbatterie II durch den Taster II und die Leitung L zum Taster I. Von diesem geht er um das Relais R zur Erdplatte P und durch die Erde zur Aufgabestation

zurück. Durch die Erregung des Relais wird aber der Anker desselben angezogen und dadurch der Stromkreis der Ortsbatterie geschlossen und der Schreibapparat in Tätigkeit versetzt.

Das Relais ist der empfindlichste Apparat beim Telegraphieren, denn die telegraphierten, also aus weiten Entfernungen kommenden Ströme müssen, auch wenn sie sehr schwach sind, das Relais zum Funktionieren bringen. Es muß ferner im Moment, wo der Strom aufhört, auch der Anker des Relais losgelassen werden, damit die Zeichen am Morseapparat exakt entstehen. Darin besteht nun ein Mangel des eben beschriebenen Relais. Denn in diesem wird der Anker immer durch eine Feder F wieder in seine Gleichgewichtslage zurückgezogen, sobald der Strom aufhört. Es muß also, namentlich beim raschen Telegraphieren, die Feder sehr exakt wirken und das ist schwer praktisch zu erreichen. Dazu kommt, daß bald ein stärkerer, bald ein schwächerer Strom auf das Relais wirkt, indem ja bald aus größerer, bald aus geringerer Entfernung telegraphiert wird, während die Feder immer die gleiche Spannung hat, also immer dieselbe Gegenkraft ausübt.

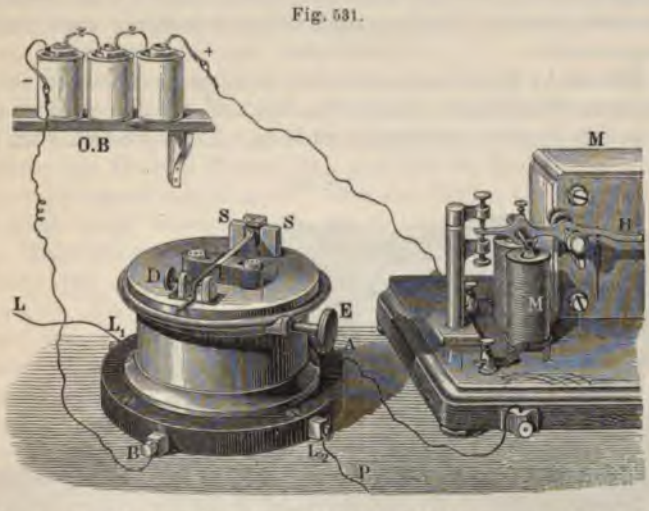
Diesem Mangel suchten verschiedene Konstrukteure auf verschiedene Weise abzuhelfen. Radikal wird er dadurch beseitigt, daß man das Relais ganz ohne Feder konstruiert. Dies haben Siemens & Halske getan, indem sie durch den Linienstrom einen Magneten nicht erst erregen, sondern durch ihn nur schon vorhandene Magnetpole verstärken und schwächen ließen. Die nach diesem Prinzip konstruierten Relais nennt man polarisierte Relais. In Fig. 530 ist ein solches abgebildet. Ein permanenter Stahlmagnet A b ist rechtwinklig gebogen und hat bei a a′ seinen Südpol, bei b seinen Nordpol. Auf dem Nordpol sitzen zwei Kerne aus weichem Eisen auf, welche also ebenfalls nordmagnetisch werden. Diese Nordpole sind mit Draht umwickelt. An dem Südpol a a′ ist der Stahlmagnet etwas aufgeschnitten und in dem Zwischenraume befindet sich der lange Hebel C d aus weichem Eisen, welcher um eine vertikale Achse drehbar ist. Dieser Hebel ist also ebenfalls südmagnetisch wie der Pol, an dem er befestigt ist. Der Hebel befindet sich zwischen den beiden Nordpolen im Gleichgewicht, wenn kein Strom durch die Spiralen der Kerne läuft. Nun wird der Strom der Linienbatterie an der Empfangsstation zuerst durch eine primäre Spule gesendet, um welche eine sekundäre Spule gewickelt ist, die mit den Spulen des Relais verbunden ist. Sowie der Linienstrom zu fließen anfängt, wird in der sekundären Spule ein Induktionsstrom erregt, und dieser fließt einen Moment in solcher Richtung um beide Magnetkerne, daß der eine, z. B. E, stärker nordmagnetisch, der andere E′ schwächer nordmagnetisch oder vielleicht gar südmagnetisch wird. Dadurch wird der Hebel C d an E herangezogen und seine Spitze d schließt dadurch den Lokalstrom. Sowie der Linienstrom aufhört, wird in der Induktionsspule ein umgekehrter Strom erzeugt und dieser fließt also umgekehrt durch die Windungen und macht nun E′ stärker und E schwächer nordmagnetisch. Dadurch wird

Fig. 530.



der Hebel sofort nach E′ gezogen und der Lokalstrom geöffnet. Auf diese Weise erhält man die Relaiswirkung ganz ohne Feder, und mit vollkommener Sicherheit und Präzision folgt der Hebel C d den Stromschließungen und Stromöffnungen. Die Verbindung des polarisierten Relais, welches zweckmäßig die Form einer Dose hat und daher auch Dosenrelais genannt wird, mit dem Schreibapparat M und der Ortsbatterie O B ist in Fig. 531 gezeichnet. Sobald durch den Linienstrom, der bei L_1 eintritt

Fig. 531.



und bei L_2 in die Erde geht, der Hebel des Relais gegen die Spitze D gezogen ist, ist die Ortsbatterie O B geschlossen, von der der Strom bei B in das Relais eintritt und bei A zum Schreibapparat geht.

Durch Zuhilfenahme des Relais ist es nun möglich, auf weite Entfernungen ebenfalls sicher zu telegraphieren.

Das Buchstabensystem bei dem Morsetelegraphen wird aus den beiden Elementarzeichen Punkt und Strich zusammengesetzt, und zwar in folgender Weise:

a	ä	b	c	d	e	f	g	h	i
·—	·—·—	—···	—·—·	—··	·	··—·	——·	····	··

j	k	l	m	n	o	ö	p
·———	—·—	·—··	——	—·	———	———·	·——·

q	r	s	t	u	ü	v	w	x
——·—	·—·	···	—	··—	··——	···—	·——	—··—

y	z	ch
—·——	——··	————

1	2	3	4	5	6
·————	··———	···——	····—	·····	—····

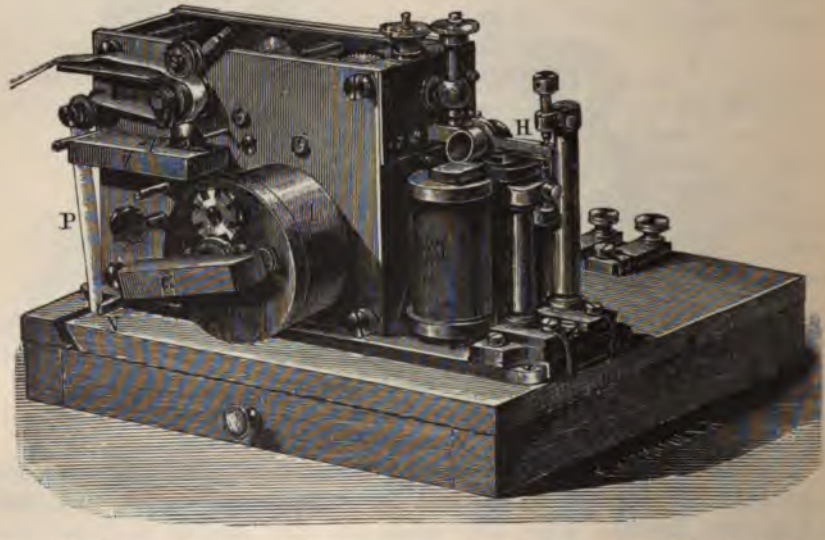
7	8	9	0
——···	———··	————·	—————

Außer diesen Zeichen sind noch eine große Zahl einzelner Dienstzeichen international verabredet.

Bei der beschriebenen Einrichtung der Morsetelegraphie wird die Linienbatterie der Aufgabestation durch den Taster geschlossen, wenn ein Zeichen telegraphiert werden soll, sonst ist sie offen und es geht kein Strom durch die Linie. Man nennt dies das Telegraphieren mit Arbeitsstrom. Häufig jedoch läßt man dauernd einen Strom durch die Linie gehen und das Telegraphieren besteht dann darin, daß dieser Strom in bestimmter Weise, länger oder kürzer, unterbrochen wird. Dies nennt man Telegraphieren mit Ruhestrom. Jede von diesen beiden Methoden hat gewisse Vorzüge und es werden daher auch beide gleich häufig angewendet.

Der Morsesche Schreibapparat, wie er oben beschrieben ist, gab die telegraphierten Buchstaben durch Punkte und Striche wieder, die durch den Stift in das Papier eingedrückt wurden. Es zeigte sich aber bald, daß

Fig. 532.



diese Zeichen nicht deutlich genug werden, und man suchte deshalb die Buchstabenzeichen farbig zu schreiben. Danach nennt man den früher beschriebenen Apparat einen Stiftschreiber, während man die nun zu erwähnenden Farbschreiber nennt. Um die Schrift farbig zu erzeugen, läßt man durch den Anker des Morsemagneten an den Papierstreifen länger oder kürzer ein mit Farbe versehenes Rädchen drücken. Dadurch werden die Zeichen alle farbig erzeugt.

Nach vielen Veränderungen ist jetzt bei den Telegraphen in der deutschen Reichstelegraphie ein Morsefarbschreiber eingeführt, der in Fig. 532 abgebildet ist. Man sieht rechts an dem Apparat den Elektromagneten M mit seinem Anker H, welcher sich zwischen den verstellbaren Anschlägen auf und ab bewegen kann. Der Anker setzt sich nun im Innern des Kästchens fort und umfaßt dort mit einem Griffe die Achse des Farbrädchens f. Die Farbe befindet sich in einem Kästchen l, in welches das Farbrad taucht. Das Farbrädchen wird also durch den Schreibhebel gehoben, wenn dieser

angezogen wird, und daher an den Papierstreifen angedrückt, wenn ein Strom durch den Apparat geht. Dadurch macht es auf dem Papier blaue Striche oder Punkte. Die Papierrolle befindet sich in dem Kasten, welcher den Boden des Apparates bildet, und das Papier P wird durch die in der Figur sichtbare Art und Weise bei N herausgezogen. Die Triebkraft für das Uhrwerk, welches das Papier herauszieht, besteht in einer Feder, welche in dem großen Federhaus T sich befindet und durch den Schlüssel G aufgezogen wird. Der Elektromagnet dieses Apparates besteht aus hohlen Eisenröhren statt der massiven Eisenkerne, damit der Magnetismus durch den Strom rasch entsteht und verschwindet.

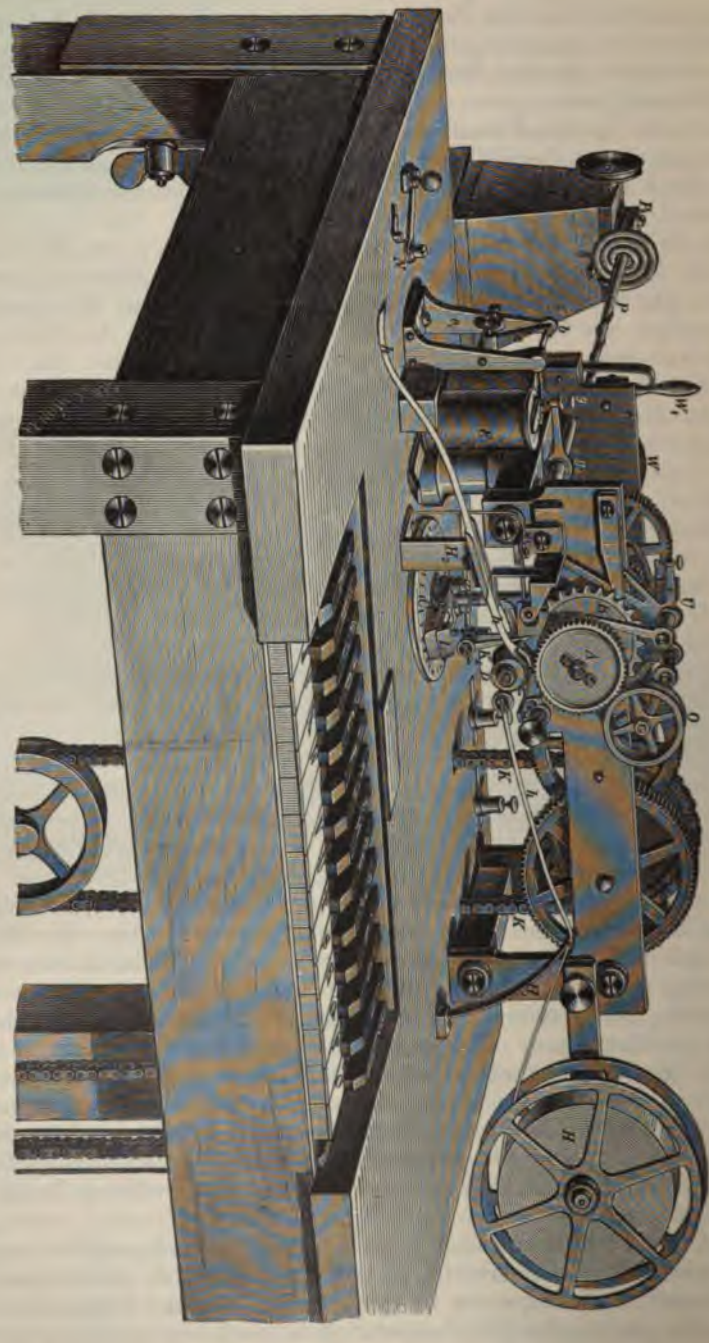
Auch bei den Morseapparaten haben Siemens & Halske in manchen Fällen dasselbe Prinzip angewendet, wie bei ihrem polarisierten Relais. Da nämlich für den Elektromagneten ähnliche Schwierigkeiten sich ergaben, wie für das Relais, daß nämlich die Feder den Anker nicht stets sofort genügend zurückzieht, wenn der Strom aufhört, daß also die Zeichen nicht exakt wurden, so brachten sie schon von vornherein permanente Magnete an den Morseapparat an. Solche Schreibapparate, die zugleich mit einer Färbevorrichtung versehen sind, nennt man polarisierte Farbschreiber.

Wenn eine Depesche ankommt und sich aufzeichnen soll, so muß das Triebwerk, welches den Papierstreifen bewegt, losgelassen werden, und es muß gehemmt werden, wenn die Depesche aufgenommen ist. Es wird dazu an passender Stelle ein Sperrhaken angebracht, welcher in eines der Räder des Uhrwerks eingreifen und dadurch die Bewegung hemmen kann, und welcher andererseits, sowie der Apparat in Gang kommen soll, von dem Rade fortgedreht werden muß. Dieses Ingangsetzen des Apparates muß aber selbsttätig geschehen, so daß auch ohne die Anwesenheit eines Beamten die Depesche sich aufzeichnet. Man überträgt also am besten dem Schreibhebel selbst die Funktion, das Triebwerk auszulösen. Das kann leicht geschehen, da ja der Schreibhebel durch den Elektromagneten kräftig angezogen wird und daher auch bei seiner Bewegung einen solchen leichten Sperrdaumen fortbewegen kann. Man nennt eine solche Vorrichtung die Selbstauslösung.

Der Morseapparat mit allen seinen Verbesserungen und Verfeinerungen ist im Grunde ein sehr einfacher Apparat. Aber das Mißliche ist bei ihm, daß er eine besondere Schrift nötig hat. Dadurch ist es erstens notwendig, das Telegraphieren und das Lesen der Telegramme besonders zu erlernen, und zweitens die empfangenen Telegramme in gewöhnliche Schrift zu übertragen. Ferner besteht jeder Buchstabe aus mehreren Zeichen, die einzeln telegraphiert werden müssen. Es entsteht dadurch ein Zeitverlust beim Telegraphieren, welcher gerade bei diesem raschen Verkehrsmittel möglichst vermieden werden sollte. Außerdem können beim Telegraphieren selbst leicht Irrtümer entstehen, da ja die einzelnen Drucke auf den Taster rasch vorübergehen und nicht ohne weiteres kontrolliert werden können.

Mit einem Morseapparat kann ein geübter Telegraphist ungefähr 100 Buchstaben in der Minute depeschieren. Um nun das Depeschieren sowohl rascher als bequemer zu machen, und um das Telegramm sofort in Druckschrift an der Empfangsstation aufzeichnen zu lassen, hat man

Fig. 533.



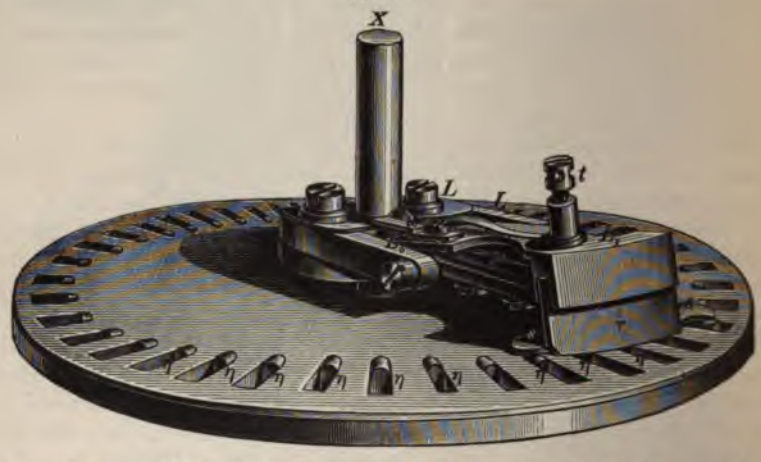
sich oft bemüht, eigene Typendrucktelegraphen zu konstruieren, welche dies ermöglichen sollten.

Von diesen Apparaten hat sich bisher hauptsächlich der Typendrucktelegraph von Hughes lebensfähig erwiesen, mit welchem man trotz seines überaus komplizierten Aussehens leicht und sicher telegraphieren kann und welcher die Geschwindigkeit des Zeichengebens auf das Fünffache gegen den Morseapparat erhöht. Der Hughessche Telegraph hat aus diesem Grunde immer mehr Eingang an großen Telegraphenämtern gefunden, bei denen es auf Geschwindigkeit des Verkehrs ankommt. Hughes erlangte die ersten Patente auf seinen Typendrucker 1855 und sein Apparat wurde zuerst in Frankreich zwischen Paris und London 1866 in Gebrauch genommen.

Das Prinzip des Hughesschen Telegraphen ist folgendes. Auf jedem Apparat befindet sich ein Rad, welches an seinem Umfange die Buchstaben, Zahlen und Interpunktionszeichen enthält, das sogenannte Typenrad. Dieses wird durch ein Räderwerk in fortlaufende, rasche Rotation versetzt, und zwar müssen die Typenräder an der Aufgabestation und an der Empfangsstation sich gleich rasch drehen und sich stets in gleicher Lage befinden, es muß Synchronismus der Bewegung an beiden Stationen stattfinden. Dieser Synchronismus wird durch einen besonderen Apparat, den Regulator, hervorgebracht, den wir hier nicht erörtern. Nun ist es bloß nötig, wenn der zu telegraphierende Buchstabe des Typenrades (in beiden Stationen) an die unterste Stelle gelangt ist, das Papier der entfernten Station zu heben, so daß sich dieser Buchstabe auf dem Papier abdrucken kann. Dies wird auf der Empfangsstation durch den Elektromagneten erreicht, der von dem ankommenden Strom erregt wird. Zu dem Ende hat der Hughessche Typendrucker, von dem Fig. 533 die äußere Ansicht gibt, eine Klaviatur, welche auf den einzelnen Tasten die Buchstaben, Zahlen und Zeichen trägt, und durch welche beim Niederdrücken einer Taste ein Strom in die entfernte Station gesendet wird. Und zwar ist die Einrichtung der Apparate so getroffen, daß der Strom nur dann in die Leitung nach der entfernten Station geschickt werden kann, sobald (oder kurz bevor) der zu druckende Buchstabe des Typenrades an die unterste Stelle gelangt ist. Danach besteht also jeder Typendrucktelegraph aus einem Räderwerk, welches das Typenrad und die Nebenapparate in Bewegung setzt, aus dem Elektromagneten und der Klaviatur mit der Vorrichtung zum Schließen des Stromes. In Fig. 533 ist A das Typenrad, E der Elektromagnet, dessen Anker das Druckrad D und mit ihm den Papierstreifen zur geeigneten Zeit gegen das Typenrad schnellen läßt. Die Klaviatur steht in Verbindung mit der Stiftscheibe C, über welcher der Läufer L rotiert. Diese sind es gerade, welche dazu dienen, daß der Strom von der niedergedrückten Taste erst dann in den entfernten Apparat fließt, wenn der zu druckende Buchstabe am Typenrad dort gerade an der untersten Stelle, also über dem Druckrad ankommt, diese sind also die wichtigsten Teile des Apparates. In Fig. 534 ist daher diese Stiftscheibe mit ihren Löchern η und dem Läufer L besonders abgebildet. Unter den Löchern befinden sich die einzelnen Stifte, die mit den Tasten der Klaviatur in Verbindung sind und durch einen Druck auf die Tasten gehoben werden, so daß sie etwas aus den

Löchern hervorragen. Der Läufer L rotiert nun fortwährend über der Stiftscheibe, und zwar mit derselben Geschwindigkeit, wie das Typenrad. Er befindet sich gerade immer über demjenigen Loche, dessen entsprechender Buchstabe auf dem Typenrad gerade die unterste Stelle einnimmt (und zwar wegen des Synchronismus sowohl auf der einen wie auf der anderen Station). Sowie der Läufer nun an einen gehobenen Stift kommt,

Fig. 534.

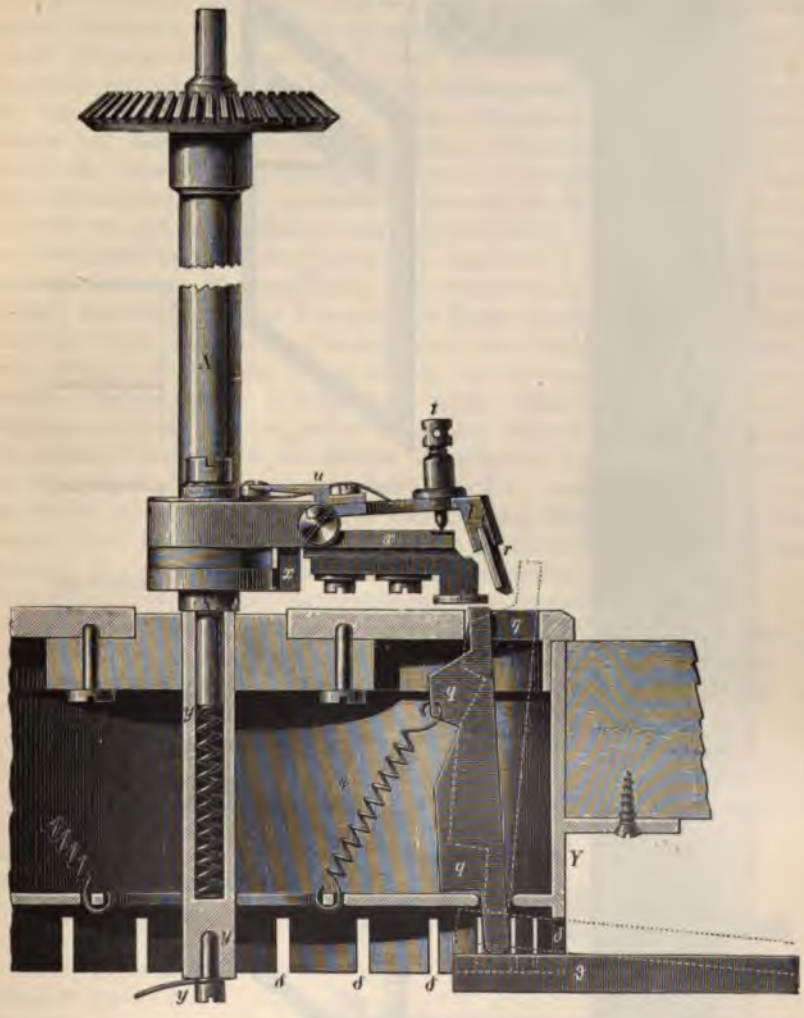


wird durch diesen Stift eine Trennung einzelner seiner Teile hervorgebracht, wie man aus Fig. 535 ersehen kann. Befindet sich der Stift q, welcher mit der Taste ϑ in Verbindung ist, in gehobener Lage, wie sie punktiert gezeichnet ist, so wird das Stück r des Läufers, die Reiberschiene, gehoben, sobald der Läufer an diese Stelle kommt, und es wird dadurch die Spitze t von x abgehoben. Dadurch geht aber ein Strom aus dem Stifte q (der mit der Batterie verbunden ist) durch t nach X, der Läuferachse, und von da aus in die Leitung zum anderen Apparat. Da die Bewegung des Läufers nun eine synchrone mit dem Typenrad ist, so kommt gerade, wenn der betreffende Buchstabe des Typenrades unten eingestellt ist, der Strom in die Leitung, und dadurch wird das Papier an der zweiten Station ein wenig gehoben und die Type abgedruckt. Dies ist im allgemeinen die Einrichtung des Hughesschen Telegraphen, bei dem im speziellen noch eine große Menge von einzelnen Feinheiten vorhanden ist, die jedoch hier nicht beschrieben werden können. Der Hughessche Apparat ist eines der größten mechanischen Kunstwerke, mit dem an Kunst nur die Nähmaschine wetteifern kann. Alle seine Teile, und es sind deren eine sehr große Menge, greifen mit der größten Exaktheit ineinander und sind dabei doch so eingerichtet, daß sie leicht herausgenommen und repariert werden können.

Die Geschwindigkeit, mit der sich das Typenrad bewegt, ist eine sehr erhebliche. Für gewöhnlich macht es 100 bis 120 Touren in der Minute. Trotz der großen Kompliziertheit arbeitet der Apparat sehr exakt, weil eine große Reihe von Einrichtungen an ihm angebracht ist, durch die er seinen Gang selbst reguliert. Vor jedem Telegraphieren

müssen sich die Beamten erst überzeugen, ob die beiden Typenräder synchron sich bewegen, was dadurch konstatiert wird, daß man dieselbe Taste mehrere Male drückt und nachsieht, ob immer derselbe Buchstabe

Fig. 535.

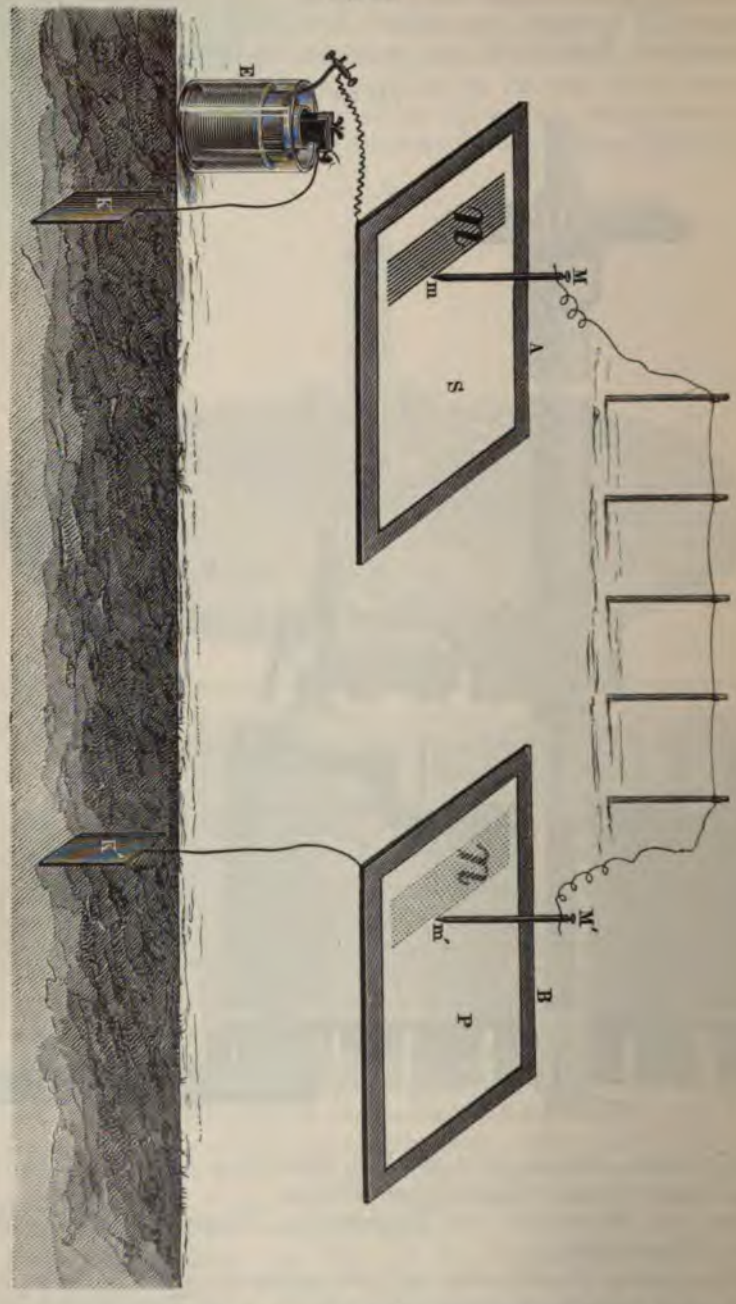


gedruckt wird. Ist das nicht der Fall, dann müssen an den Triebwerken einige Regulierungen vorgenommen werden.

Mit den Morseschen und Hughesschen Telegraphen wird jetzt allgemein telegraphiert.

Für manche Zwecke wäre es recht erwünscht, daß man seine eigene Schrift oder ganze Zeichnungen telegraphisch in die Ferne senden könnte. Das erstere würde im kaufmännischen Leben manche Anwendungen erfahren, das letztere namentlich im Dienste der Polizei zur Abtelegraphierung

Fig. 536.



der Signalements von flüchtigen Verbrechern wertvoll sein. Man hat sich vielfach bemüht, Einrichtungen für diesen Zweck zu treffen, aber

diese haben sich in der bisherigen Form nicht praktisch einbürgern können. Man nennt derartige Telegraphen Kopiertelegraphen. Eine ganze Reihe von Erfindern hat solche Kopiertelegraphen auf verschiedene Weise hergestellt. Das Wesen eines derselben, des Caselli schen Pantelegraphen, der auf den chemischen Wirkungen des Stromes beruht, wird aus der Fig. 536 erkennbar sein. Auf jeder der beiden Stationen befindet sich eine Metallplatte. In der Aufgabestation wird die Depesche mit einer nichtleitenden Harzlösung auf die Platte geschrieben, auf der Empfangsstation liegt ein mit Blutlaugensalzlösung getränktes Papier auf der Metallplatte. In beiden Stationen werden zwei Stifte durch ein Uhrwerk vollkommen synchron in Bewegung gesetzt, so daß sie nahe aneinander liegende, parallele Striche auf den Platten machen. Solange der Stift auf der ersten Station das leitende Metall berührt, geht ein Strom von der Batterie durch die Leitung zu dem Stift der zweiten Station und zersetzt dort das Blutlaugensalz, aus welchem sich Berlinerblau bildet, so daß auf dem dortigen Papierblatte blaue Striche erscheinen. Sobald aber der Stift der ersten Station über den nichtleitenden Buchstaben sich bewegt, fließt kein Strom durch die Leitung und das Papier der zweiten Station bleibt infolgedessen weiß. Man erhält daher auf der Empfangsstation die Depeschen in weißer Schrift auf blauem Grunde. Die große Schwierigkeit bei diesem Telegraphen liegt in der Herstellung des übereinstimmenden Ganges beider Stifte, welcher hier nicht durch den Strom selbst reguliert werden kann. Diese Telegraphen haben bisher wegen ihrer Kompliziertheit noch keine größere Verwendung gefunden. Es wird in den letzten Jahren auf verschiedenen Seiten eifrig an der Vervollkommnung dieser Kopiertelegraphen gearbeitet.

Eine besondere Aufgabe in der praktischen Telegraphie ist die Verbindung mehrerer Stationen untereinander. Zwischen zwei Stationen, die miteinander telegraphieren wollen, liegt gewöhnlich eine Reihe von Zwischenstationen. Außerdem ist von den Hauptstationen aus immer eine Umschaltung des Stromes nach anderen Linien erforderlich. Alle die dazu nötigen Anordnungen und Vorschriften, die unter dem Begriff der Schaltungslehre zusammengefaßt werden, liegen außerhalb des Rahmens dieses Buches, sie sind in speziellen Werken über Telegraphie enthalten.

Fig. 537.

Fig. 538.

Die Verbindung zwischen zwei Landstationen kann entweder eine oberirdische sein oder eine unterirdische. Man nimmt für die oberirdischen Leitungen jetzt Eisendraht oder Siliziumbronzedraht von 4 mm Durchmesser, bei großen Verkehrslinien auch von 5 mm Durchmesser. Der Draht muß natürlich gut leitend und isoliert sein. Es müssen deshalb die einzelnen Drähte einer Linie sorgfältig miteinander verbunden werden, was durch feste Umschlingung und

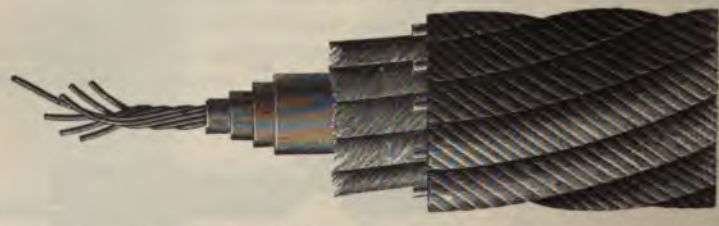
Verlötung der Enden erreicht wird, wie es Fig. 537 und 538 in zwei Beispielen zeigen. Um gute Isolation an den Unterstützungspunkten zu erreichen, verwendet man als Träger gewöhnlich Holzstangen und windet die Drähte um isolierende Porzellanglocken, wie Fig. 539 eine zeigt.

Fig. 539.

Viel schwieriger ist die unterirdische Verbindung zweier Stationen. Dann müssen die Drähte in das feuchte Erdreich oder in Flüsse gelegt werden, und um hier genügende Isolation zu erreichen und zugleich die Drähte vor Zerstörung durch Feuchtigkeit zu schützen, müssen sie mit isolierendem und widerstandsfähigem Material umkleidet werden. Man benutzt also dazu Kabel. Es waren große technische Schwierigkeiten zu überwinden, bevor es gelang, genügend isolierte und sichere Kabel anzufertigen.

Man verwendet für die Kabel nur Kupferdrähte und benutzt statt eines dicken mehrere nebeneinander geschaltete dünne Drähte, wie in Fig. 540, welche die einzelnen Teile eines Kabels sehen läßt. Diese dünnen Kupferdrähte, gewöhnlich von je 0,7 mm Durchmesser, werden in eine Guttaperchahülle eingepreßt, was die Aufgabe eines besonderen Fabrikationszweiges ist. Es werden immer mehrere Guttaperchastränge in ein Kabel vereinigt. Diese Guttaperchaadern werden nun umeinander gewunden, so daß etwa sechs im Kreise um eine siebente herumliegen. Diese Schicht nennt man dann die Kabelseele. Um die Seele wird eine doppelte Lage von geteertem Hanfgarn gelegt und diese mit einer

Fig. 540.



Hülle von verzinkten Eisendrähten umgeben oder jetzt gewöhnlich mit einem gepreßten Bleimantel versehen. Das ganze Kabel wird dann asphaltiert und nochmals mit Hanfgarn umsponnen.

Während die ersten Telegraphenanlagen in Deutschland 1830 entstanden und vom Jahre 1843 ab sich die Telegraphie allgemein rasch verbreitete, so daß in einigen Jahrzehnten sich ein Netz von Telegraphendrähten über alle Länder ausbreitete, ging der Gedanke, den 1843 Wheatstone zuerst gehabt zu haben scheint, unterseeische Telegraphenleitungen zu legen, erst sehr spät seiner Verwirklichung im großen entgegen. Auf kurze Strecken allerdings legte man bald unterseeische Kabel, so schon 1852 zwischen England und Irland. Aber erst 1866 gelang nach vielen

mißglückten Versuchen die Legung eines Kabels zwischen Europa und Amerika durch den Atlantischen Ozean. Diese mißglückten Versuche begannen im Jahre 1857, wo man am 6. August anfing, ein Kabel zwischen Irland und Amerika zu legen. Aber bereits am 11. August riß dasselbe, etwa 70 deutsche Meilen von der Küste. Das Jahr 1858 brachte schon neue Versuche unter Berücksichtigung der gewonnenen Erfahrungen, aber wieder riß das eine Kabel, während das andere nach kurzer Zeit zerstört wurde. Erst 1864 war wieder ein Kabel fertig von an 600 deutschen Meilen Länge, es wurde auch glücklich durch den „Great Eastern" gelegt, zerriß aber bald wieder (1865) mitten im Meere, etwa 250 Meilen von Irland entfernt. Endlich im folgenden Jahre, 1866, wurde ein neues Kabel gelegt, welches bis nun, trotz mancher Beschädigungen, ausgehalten hat. Zugleich wurde das Kabel vom Jahre 1865 durch den „Great Eastern" wieder aufgefischt und ausgebessert, und so waren sofort zwei telegraphische Verbindungen zwischen Europa und Amerika hergestellt. In kurzer Folge wurde dann noch eine Reihe von Kabeln durch den Atlantischen und Großen Ozean und andere Meere gelegt und so alle Teile der zivilisierten Welt miteinander verbunden.

Die Kabeltelegraphie fand zuerst sehr unerwartete Schwierigkeiten vor, auch abgesehen von den Unfällen bei der Legung der Kabel. Es zeigte sich nämlich, daß ein solches Kabel, welches ja aus inneren Kupferdrähten und äußeren Eisendrähten und einer isolierenden Zwischenschicht besteht, als Kondensator wirkt. Es sammelt sich also auf einem solchen Kabeldraht, der mit dem einen Pole einer Batterie verbunden ist, sehr viel Elektrizität an, da ja die Kapazität eines Kondensators infolge der Anwesenheit der influenzierten Hülle eine sehr große ist. Man erhält daher einerseits Ladungserscheinungen und dadurch andererseits große Verzögerung des Stromes. Daraus ergeben sich nun sehr schwierige Verhältnisse für die Telegraphie. Denn wenn von der ersten Station aus ein Kabel geladen ist und dann die Batterie beim Telegraphieren von dem Kabel momentan entfernt wird, also das Kabel an der ersten Station mit der Erde in Verbindung gebracht wird, so fließt die angesammelte Elektrizität in entgegengesetzter Richtung durch die Apparate in die Erde. Es entsteht der sogenannte Entladungsstrom oder Rückstrom. Ist die zweite Station isoliert, so fließt die ganze Elektrizität durch die erste zur Erde ab. Es geht also durch die Apparate nach jedem Telegraphierstrom ein Strom in entgegengesetzter Richtung, und dadurch kommen alle die Apparate in unbeabsichtigte und schädliche Tätigkeit. Man hat diesen Rückstrom auf verschiedene Weise paralysiert. Durch Anwendung der polarisierten Relais und der polarisierten Farbschreiber wird die Wirkung des Entladungsstromes unschädlich gemacht, da ja bei diesen eben nur ein Strom in einer bestimmten Richtung die beabsichtigte Wirkung hervorbringt. Bei der Submarintelegraphie, die mit viel empfindlicheren Apparaten arbeitet, als es die Farbschreiber sind, hilft man sich zum Teil dadurch, daß man bei jeder Öffnung des Telegraphierstromes einen entgegengesetzten Strom vermittels einer besonderen Batterie durch die Leitung sendet und dadurch den Rückstrom paralysiert. Bei großen unterseeischen Entfernungen wendet man jetzt fast allgemein Kondensatoren an, durch die derselbe Zweck er-

reicht wird. Man läßt nämlich an der Aufgabestation durch den Telegraphierstrom die eine Belegung eines großen Kondensators laden, dessen andere Belegung mit dem Kabel verbunden ist. Dadurch wird die gleichnamige Elektrizität in entsprechender Weise durch das Kabel gesendet. Beim Aufhören des Telegraphierstromes vereinigt sich die Entladungselektrizität des Kabels mit der entgegengesetzten Elektrizität der mit ihm verbundenen Kondensatorbelegung, während von der anderen Belegung der Strom einfach zur Erde abfließt.

Es erforderte also die submarine Telegraphie ganz neue Einrichtungen der Instrumente, Einrichtungen, die zum großen Teil von Werner Siemens ausgingen. Bei der transatlantischen Telegraphie wurde übrigens, um mit den schwächsten Strömen arbeiten zu können, zunächst auf die von Gauß und Weber angewendete, aber allerdings bedeutend verfeinerte, Methode der Nadeltelegraphie zurückgegangen. Die Ströme wurden durch die Windungen eines sehr empfindlichen Multiplikators gesendet und die Ausschläge des Magneten durch ein Fernrohr beobachtet. Indes gelang es Lord Kelvin (William Thomson), einen Apparat zu konstruieren, der, auf ähnlichem Prinzip beruhend, auch dauernde Schriftzeichen durch die Kabel zu übermitteln gestattet. Dieser Apparat wurde von ihm Syphonrekorder genannt und wird auch heute noch zum Teil so, zum Teil als Heberschreibapparat bezeichnet. Thomson hat in diesem Apparat die Einrichtung, wie sie bei den Deprezschen Galvanometern (S. 192) benutzt wird, um fast 30 Jahre vorweggenommen. Bei dem Syphonrekorder befindet sich nämlich auch eine Drahtspule zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten. In die Spule treten die durch das Kabel ankommenden Ströme und die Spule dreht sich, wie wir wissen. Mit der Spule ist nun durch einen gespannten Faden ein kleiner Glasheber verbunden, aus dem Farbe dauernd in kleinen Tröpfchen ausspritzt und zwar auf ein direkt vor ihm befindliches Papierband, welches an ihm vorbeigezogen wird. Bei den Bewegungen der Drahtspule, die man Rekorderspule nennt, die bald nach der einen, bald nach der anderen Seite geht, beschreibt infolgedessen der Heber (Syphon) eine Linie mit hin und her gehenden Ausbuchtungen auf dem Papier, und da jeder Buchstabe durch bestimmte Bewegungen charakterisiert ist, so hat man damit sichtbare Telegraphenschrift. Durch die Anwendung des Syphonrekorders (und jetzt auch in vielen Fällen eines anderen Apparates, des Muirhead Rekorders) ist die Geschwindigkeit, mit der man auf Kabeln telegraphieren kann, außerordentlich vergrößert worden. Während man mit Spiegelgalvanometern bloß 12 Buchstaben in der Minute telegraphieren konnte, gelingt es mit diesen Apparaten 100 bis 150 Buchstaben zu telegraphieren.

Die große Schnelligkeit, mit welcher man auf telegraphischem Wege Signale fortpflanzen und Bewegungen auslösen kann, hat zu einer großen Reihe von Verwendungen der Telegraphen zu verschiedenen Zwecken geführt. Insbesondere hat der Eisenbahnbetrieb die Telegraphie zu den allerverschiedensten Leistungen benutzt, teilweise um Signale zu geben, teilweise aber auch, um zur bestimmten Zeit selbsttätig gewisse Vorrichtungen vornehmen zu lassen. Doch liegen diese unzähligen Anwendungen nicht im Rahmen dieses Werkes.

14. Kapitel.

Telephon und Mikrophon.

Konnte die Telegraphie auch lange das Bedürfnis des Verkehrs befriedigen, indem sie es gestattete, Mitteilungen jeder Art rasch zwischen zwei beliebig voneinander entfernten Personen zu übertragen, so brauchte sie dazu doch immer Vermittler, welche die Worte in telegraphische Zeichen und diese wieder in Worte umsetzten. Auch diese Beschränkung fiel durch die Erfindung des Telephons, welches die Worte selbst in die Ferne zu tragen, also ein Fernsprechen und Fernhören gestattet.

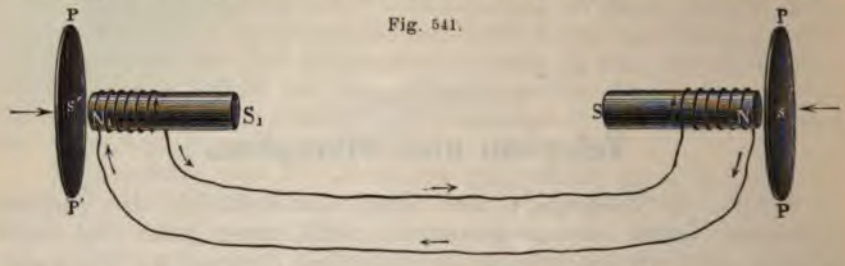
Das Telephon in der Gestalt, wie es sich in kurzer Zeit einen Platz unter den wichtigsten Verkehrsmitteln der Menschheit errungen hat, ist einer der genialsten Apparate, den die Physik kennt, um so genialer, da er in überaus einfacher Weise konstruiert ist und Naturgesetze benutzt, die alle längst bekannt und angewendet waren. Es ist ein Amerikaner, Graham Bell, dem wir die Erfindung des Telephons verdanken. Zwar waren schon früher Versuche gemacht worden, Töne vermittels der Elektrizität in die Ferne zu senden, insbesondere hat Philipp Reis 1860 ein Telephon konstruiert, durch welches auch bereits Worte und Töne elektrisch übermittelt werden konnten, aber einen praktischen Erfolg erlangte dieses Unternehmen erst durch die einfache Konstruktion von Bell.

Die Aufgabe war, Töne und Worte elektrisch auf größere Entfernungen zu übertragen. Töne sind ja nichts anderes als Schwingungen des tönenden Körpers, also eine bestimmte Art von Bewegung. Die Aufgabe, Töne zu übertragen, ist also ein spezieller Fall der Aufgabe, auf elektrischem Wege Bewegungen zu übertragen. Es soll an einer Stelle, an einer Station ein Körper in schwingende Bewegung versetzt werden, diese Bewegung soll elektrische Ströme erzeugen, welche nach der anderen Station fortgepflanzt werden, und dort sollen diese Ströme wieder schwingende Bewegungen, Töne hervorbringen, die elektrische Energie soll sich wieder in Bewegungsenergie umsetzen.

Die Art und Weise, wie Bell dieses Problem mit den einfachsten Mitteln gelöst hat, haben wir bereits einmal auf S. 220 im Prinzip kennen gelernt. An jeder der beiden Stationen befindet sich ein mit einer Drahtspule umwickelter Stahlmagnet (Fig. 541). Die beiden Drahtspulen sind miteinander zu einem geschlossenen Kreis verbunden. Vor jedem dieser permanenten Magnete befindet sich in geringer Entfernung eine dünne Platte aus weichem Eisen, welche an ihrem Rande befestigt ist. Diese Platten werden durch die Nähe des Magneten selbst temporär magnetisch. Sobald nun die eine Eisenplatte etwas zu ihrem Magneten hingebogen wird, wirkt ihr Magnetismus auf die Umwindungsspule des

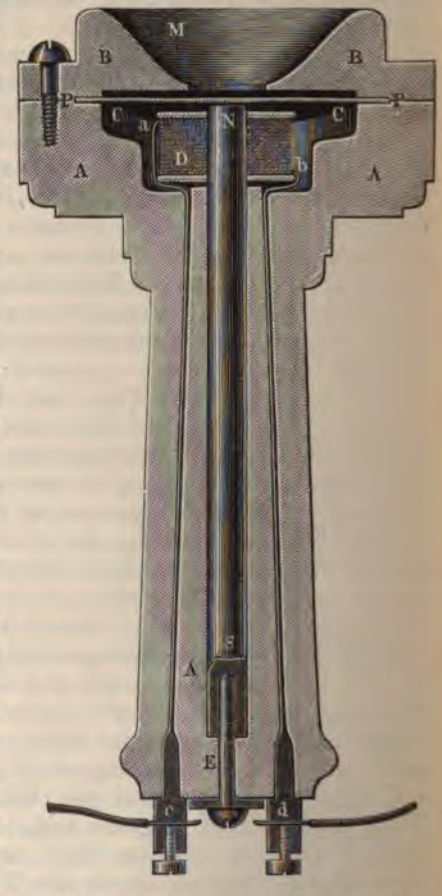
Magneten und erzeugt in dieser einen Induktionsstrom in einer bestimmten Richtung. Dieser pflanzt sich durch die Leitung fort bis zu dem Magneten

Fig. 541.



der zweiten Station, umfließt diesen in passender Richtung und verstärkt dadurch dessen Magnetismus. Infolgedessen zieht der stärker gewordene Magnet dort die vor ihm stehende Eisenplatte an, diese biegt sich auch gegen den Magneten hin, macht also dieselbe Bewegung wie die Platte der ersten Station. Dasselbe findet statt, wenn die erste Eisenplatte von ihrem Magneten etwas entfernt wird. Dann entfernt sich infolge des entstehenden Induktionsstromes auch die zweite Eisenplatte von ihrem Magneten. Macht also die erste Eisenplatte Schwingungen hin und her, so macht die zweite Eisenplatte genau dieselben Schwingungen.

Fig. 542.

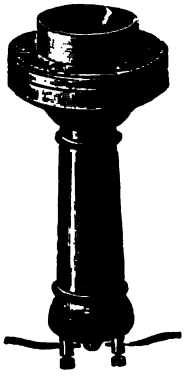


Ganz nach diesem Schema ist das Telephon von Graham Bell eingerichtet, welches in Fig. 542 abgebildet ist. In einem Holzgehäuse befindet sich ein Magnetstab N S, dessen Nordpol von einer Drahtspirale D aus sehr feinem, dünnem Draht umgeben ist. Dicht über ihm, aber ohne ihn zu berühren, befindet sich die dünne Platte C aus weichem Eisen, welche mit ihren Rändern in dem Holzgehäuse bei P P befestigt ist. Der Deckel hat eine Öffnung, durch welche die Mitte der Eisenplatte frei liegt, so daß man an sie heransprechen und -singen kann. Jeder Ton versetzt die Platte in schwingende Bewegung und diese pflanzt sich auf elektrischem Wege durch die Drahtleitung zur entfernten Station fort, wo sie dieselben Schwingungen, denselben Ton hervorbringt. Die äußere Ansicht des

Telephons von Bell gibt Fig. 543. Die Klemmschrauben unten nehmen die Leitungsdrähte auf, die zu dem Telephon der zweiten Station führen.

Bei einem jeden Ton haben wir drei Elemente zu unterscheiden: die Tonhöhe, die Tonstärke und die Klangfarbe. Die Höhe und die Stärke eines Tones müssen sich nun ohne weiteres durch das Telephon fortpflanzen lassen. Denn die Tonhöhe ist die Anzahl der hin und her gehenden Bewegungen der Platte in einer Sekunde. Eine jede solche Bewegung erzeugt einen entsprechenden Strom,[5] und die Anzahl der Induktionsströme ist genau gleich der Anzahl der Schwingungen des Tons. Die Stärke des in das Telephon hineingesungenen oder hineingesprochenen Tones beeinflußt die Stärke der Durchbiegung der Eisenplatte. Durch einen stärkeren Ton wird die Eisenplatte kräftiger und weiter an den Magneten herangedrückt oder von ihm entfernt, und infolgedessen werden auch die Induktionsströme stärker. Das Telephon folgt daher auch genau jeder Veränderung in der Tonstärke der hineingesprochenen Töne. Ja es leistet noch mehr. Das dritte Element, welches einen jeden Klang charakterisiert, ist seine Farbe, die Klangfarbe (Timbre). Die menschliche Stimme hat einen anderen Klang, eine andere Klangfarbe als eine Violine oder eine Trompete. Der Unterschied dieser Klangfarben beruht nach den berühmten Untersuchungen von Helmholtz darauf, daß in einem Klang nicht bloß eine einzige Art von Schwingungen vorhanden ist, nicht bloß eine Bewegung mit einer bestimmten Schwingungszahl, sondern daß in einem Klang außer einem Grundton zugleich noch eine ganze Reihe von anderen Schwingungen enthalten ist, deren Schwingungszahlen ganze Vielfache des Grundtones sind. Die Tonhöhe eines Klanges ist durch die Schwingungszahl des Grundtones bestimmt. Außerdem vollführt aber jedes Teilchen noch eine Menge von Schwingungen mit anderen Schwingungszahlen, die Helmholtz Obertöne nennt, und diese bringen eben die Farbe der Klänge hervor. Es können in einem Klang viele dieser Obertöne vorhanden sein, in einem anderen weniger, es können aus der Reihe der Obertöne einige fehlen, einige verhältnismäßig stärker sein als die anderen, alles dieses bringt die verschiedene Färbung der Klänge hervor. Alle diese Umstände müssen sich aber auch bei der telephonischen Übertragung des Schalles erhalten. Denn wenn ein Teilchen in komplizierter Weise hin und her schwingt, mit bald größerem, bald geringerem Ausschlag, bald rascher, bald langsamer, so werden ganz analog dieser Schwingungsart auch die elektrischen Ströme in gleicher Weise verändert, und daher muß die Eisenplatte des zweiten Telephons auf der Empfangsstation in ganz gleicher Weise komplizierte Schwingungen machen. Die Schwingungen dieser Eisenplatte teilen sich dann der umgebenden Luft mit, und so muß man an der Empfangsstation die Töne und Worte in gleicher Tonhöhe, gleicher Klangfarbe und entsprechender Stärke hören.

Fig. 543.



In entsprechender Stärke. Denn die Stärke des an der Empfangsstation wiedergegebenen Tones muß notwendigerweise eine viel geringere

sein als die Stärke des an der Aufgabestation hineingesprochenen Tones. Die Bewegungsenergie der Luftteilchen, welche in Schwingungen versetzt sind, muß sich ja zuerst der Eisenplatte mitteilen, wodurch schon ein großer Teil von ihr verloren geht. Durch die Umsetzung der mechanischen Energie in elektrische geht wieder ein Teil verloren und durch die Rückumsetzung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie tritt ein neuer Verlust ein. Daher ist es klar, daß der nach vielen Umsetzungen erzeugte Schall auf der zweiten Station viel geringere Stärke haben muß als der aufgegebene, wenn man nicht besondere Hilfsmittel anwendet, um ihn zu verstärken.

Trotz dieser vielen Verluste läßt sich aber doch mit dem einfachen Bellschen Telephon Stimme und Sprache sehr vernehmlich übertragen. An der Aufgabe- und Empfangsstation sind dabei die Telephone ganz gleich eingerichtet. Ein jedes dient zugleich als Tonsender und als Tonempfänger. Je größer der Abstand zwischen beiden Stationen ist, desto größer ist der Widerstand der Drahtleitung, desto geringer wird also die Stromstärke und desto geringer die Wirkung des Telephons. Es läßt sich deshalb das Bellsche Verfahren nur für kurze Strecken, einige hundert Meter weit, benutzen. Nichtsdestoweniger hatte das Bellsche Telephon unwiderleglich die Möglichkeit bewiesen, den Schall auf elektrischem Wege zu übertragen, und es kam jetzt nur noch darauf an, die Wirkungen zu verstärken. Ein sehr naheliegendes Mittel dazu besteht darin, daß man in dem Gehäuse des Telephons nicht einen Stabmagneten, sondern einen kräftigen Hufeisenmagneten anbringt, wie in Fig. 544. Die Pole desselben sind mit Polschuhen a_1 a_1 versehen, die ganz eng aneinander stehen und je mit einer Drahtspule b b so umwickelt werden, daß die in ihnen gleichzeitig erzeugten entgegengesetzten Ströme sich gegenseitig verstärken. Der Hufeisenmagnet ist unten an einer feinen Schraube d befestigt, durch welche er der Eisenplatte genähert oder von ihr entfernt werden kann, damit man die möglichst größte Wirkung erhält. Die äußere Ansicht eines solchen Telephons von Mix & Genest in Berlin mit Leitungsschnüren zeigt Fig. 545.

Fig. 544.

Man kann dem Hufeisen zweckmäßig noch andere Formen geben, namentlich, um es bequem fassen zu können. So werden bei dem Löffeltelephon (Fig. 546) die Polschuhe mit den Drahtrollen senkrecht zum Hufeisen gesetzt, so daß Membran und Hörmuschel parallel zum Griff sind. Bei dem Ringtelephon, das in Frankreich viel benutzt wird, ist der Hufeisenmagnet ringförmig gebogen, wie es Fig. 547 bei A zeigt, und dient direkt als Griff für das Telephon. Seine Pole B B sind mit den Drahtspiralen umgeben und über ihnen befindet sich die Eisenmembran. Bei dem Dosentelephon (Fig. 548) ist der halbkreisförmige Hufeisenmagnet in einer Dose untergebracht und seine Polschuhe stehen senkrecht auf ihm, gegen den Deckel der Dose zu, wie man aus Fig. 549 sieht, welche die Dose geöffnet zeigt.

Bei der ersten Einführung des Telephons geschah in der Tat das Sprechen sowohl wie das Hören durch zwei ganz gleich eingerichtete Apparate. Die durch die Induktionswirkung in dem einen Telephon erzeugten Ströme dienten ganz direkt dazu, um das zweite Telephon in Tätigkeit zu setzen. Man braucht keine besondere Batterie, um mit solchen Telephonen zu sprechen, sondern man erzeugt die Ströme durch das Sprechen selbst. Die Schallenergie, die man dabei in das erste Telephon hineingibt, setzt sich in elektrische Energie um, und diese wird schließlich wieder zu Schallenergie. Die Verluste an Energie, die auf diesem Wege entstehen, müssen aber notwendig den Schall an der zweiten Station erheblich schwächen.

Fig. 545.

Fig. 546.

Wenn man nun bewirken könnte, daß man dem Telephon auf der Empfangsstation noch andere Energie von außen zuführen könnte, etwa

Fig. 547.

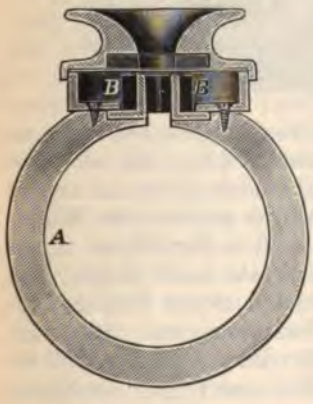


Fig. 548.

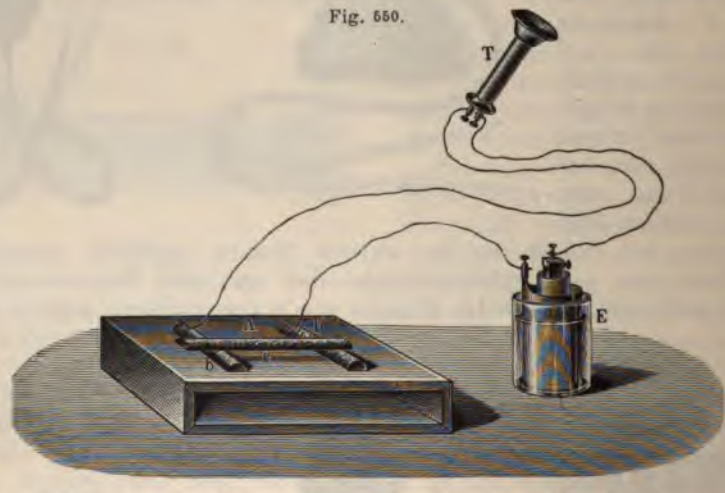
Fig. 549.

die elektrische Energie eines galvanischen Stromes, so hätte man dadurch ein Mittel, um den Verlust bei der Umwandelung kompensieren oder wenigstens geringer machen zu können. Es ist nur die Frage, ob dies

ausführbar ist. Es ist dies in der Tat möglich geworden durch das von Hughes erfundene Mikrophon. Die Wirkungsweise des Telephons verlangt ja im Grunde weiter nichts, als daß durch die hineingegebenen Töne periodische Schwankungen in der Stromstärke eintreten, welche dann durch die Anwendung von Magneten wieder in periodische Bewegungen umgesetzt werden. Bei dem einfachen Telephon werden aber durch die hineingesprochenen Worte nicht bloß Änderungen in der Stromstärke erzeugt, sondern die Ströme werden selbst erst dadurch hervorgebracht. Es ist das offenbar überflüssig. Wenn man von vornherein einen Strom hat, z. B. durch ein galvanisches Element erzeugt, so braucht man durch die Worte und Töne nur Schwankungen in der Stromstärke hervorzurufen, und kann dann diese durch ein Telephon wieder in Worte umsetzen. Diese periodischen Stromschwankungen nun hat Hughes durch Anwendung von variablen Kontakten an Kohlenstäben hervorgebracht.

Die Kohle hat, wie wir wissen, einen sehr erheblichen Leitungswiderstand. Wir wissen aber auch (S. 85), daß dieser Widerstand sich

Fig. 550.

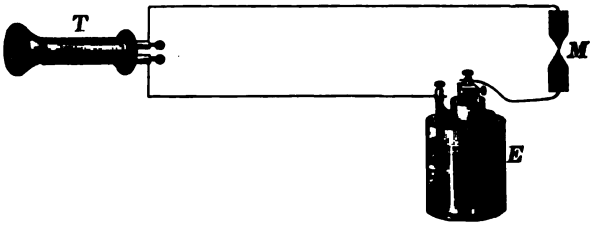


durch Druck sehr erheblich ändert. Die Idee von Hughes bestand nun darin, durch die Schallbewegungen zwei Kohlenstäbchen, die sich gerade eben berühren und durch die ein Strom hindurchgeht, in engere und weniger enge Berührung miteinander zu bringen und so den Widerstand derselben und dadurch die Stromstärke in dem Stromkreis in erhebliche Schwankungen zu versetzen. Man kann sehr leicht zeigen, daß man durch ganz geringe Veränderungen des Druckes zweier Kohlen aufeinander sehr erhebliche Stromschwankungen bekommt, und daß man dadurch ein Telephon zum lauten Tönen bringen kann. In Fig. 550 ist eine Vorrichtung dazu abgebildet. Von einem Element E geht ein Strom durch eine Kohle b, dann durch die leise darauf gelegte Kohle c zu der anderen Kohle b, durchläuft dann die Windungen des Telephons und kommt zum Element zurück. Solange das Kohlenstäbchen c ganz ruhig auf b liegt, hört man natürlich nichts, weil ja die Stromstärke unverändert

bleibt. Die leiseste Bewegung von c aber, z. B. schon eine Bewegung, die dadurch hervorgebracht wird, daß eine Fliege auf dem Kästchen A geht, bringt sofort ganz erhebliche Stromschwankungen hervor, und infolgedessen wird der Magnet des Telephons verstärkt und geschwächt und man hört im Telephon ein lautes Geräusch. Diesen Apparat, ein paar lose sich berührende Kohlen, auf einer Schallmembran befestigt, nennt man ein Mikrophon.

Hier hat man also ein einfaches Mittel, um in einem Telephon ganz erhebliche Stromschwankungen hervorzubringen. Man braucht eben nur einen galvanischen Strom von einem Element durch ein Telephon und ein Mikrophon zu senden und dann gegen das Mikrophon zu sprechen, um in dem Telephon die Töne in ganz erheblicher Stärke reproduziert zu erhalten. Natürlich kann dabei das Mikrophon in der einen Station, das Telephon in der anderen sein. Der Unterschied dieser Hughesschen Anordnung von der Bellschen ist also ein doppelter. Bei der Bellschen Telephoneinrichtung werden zwei gleiche Apparate zum Sprechen und Hören benutzt. Der Tonsender oder, wie man auch häufig sagt, der Transmitter und der Tonempfänger sind beide einfache Telephone. Bei der Hughesschen Anordnung dagegen ist der Transmitter nicht ein Telephon, sondern ein Mikrophon. Der zweite Unterschied ist der, daß man bei der Bellschen Anordnung kein galvanisches Element braucht. Durch das Sprechen werden im ersten Telephon Induktionsströme erregt und diese bringen das zweite Telephon in Tätigkeit. Bei der Hughesschen Anordnung dagegen muß das Mikrophon in einem Stromkreis liegen, durch den ein Strom von einem Element fließt. Das Sprechen dient nur dazu, die Stärke dieses schon vorhandenen Stromes in bestimmter Weise zu verstärken und zu schwächen.

Fig. 551.



Die Anordnung, wie sie bei dem Hughesschen Mikrophon nötig ist, wäre also eine solche, wie sie in Fig. 551 gezeichnet ist. Der Strom fließt vom Element E der Aufgabestation durch das Mikrophon M derselben Station, dann durch die Leitung zur zweiten Station und direkt durch die Spule des Telephons T dieser Station und von dort durch die Leitung zur ersten Station nach E zurück. Dabei wird also das Telephon der zweiten Station stets von dem Strome durchflossen, der von dem Element E durch die Leitung gesendet wird.

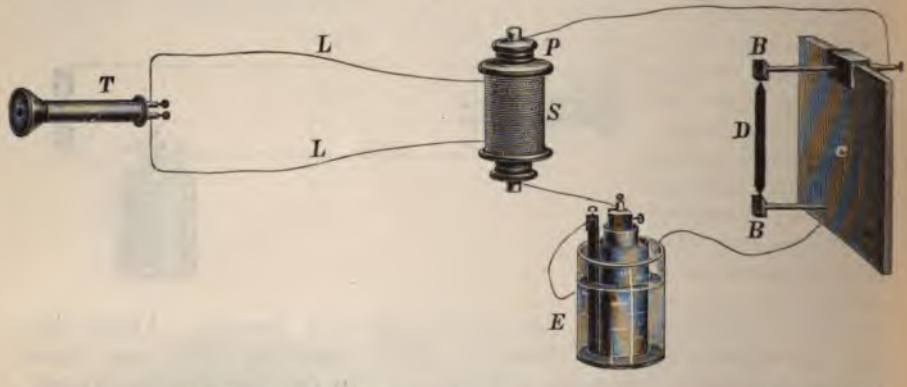
Man kann aber das Telephon der Empfangsstation auch aus diesem Stromkreis entfernen, und diese Anordnung ist für die Schaltung von solchen Apparaten sehr vorteilhaft. Um das zu erreichen, sendet man nicht den veränderlichen Strom des Elements direkt durch die Telephonspirale, sondern vielmehr in die primäre Spule einer Induktionsrolle. Die in der sekundären Spule dieser Induktionsrolle erzeugten Induktionsströme

läßt man dann erst durch das Telephon gehen. Dadurch erzielt man hauptsächlich den Vorteil, daß sich bei dieser Anordnung die Verbindungen mehrerer Stationen auf sehr einfache Weise herstellen lassen.

Bei dieser Einrichtung fließt also (Fig. 552) in der ersten Station der Strom von Element E durch das Mikrophon B D B und dann einfach durch eine primäre Induktionsspule P in derselben Station hindurch und zum Element zurück. Um die primäre Induktionsspule ist dann, getrennt, eine sekundäre Induktionsspule S gewunden, in welcher die Induktionsströme erregt werden, und diese ist durch eine Leitung L mit dem Telephon T der zweiten Station verbunden. Die in S induzierten Ströme verstärken oder schwächen den Magneten des Telephons und bringen es dadurch zum Tönen.

Da man auf jeder Station sprechen und hören können muß, so muß auf jeder Station ein Telephon und ein Mikrophon vorhanden sein. Es sind dann auf jeder Station auch die beiden Induktionsspulen notwendig.

Fig. 552.



Bevor wir jedoch die Verbindungen dieser Apparate, wie sie sich bei wirklichem Betrieb als zweckmäßig herausgestellt haben, untersuchen, wollen wir erst einige der verschiedenen Formen, welche man dem Mikrophon bisher gegeben hat, kennen lernen.

Das erste Mikrophon von Hughes bestand einfach aus einem Resonanzbrettchen, an welchem, wie in Fig. 552, zwei Kohlenstücke angebracht waren. Diese hatten kleine Vertiefungen an zwei Stellen und in diese war ein Kohlenstäbchen lose eingestellt. Sprach man gegen das Resonanzbrettchen, so kamen die Kohlen in entsprechende Vibrationen und in dem Telephon der zweiten Station wurden die Worte gehört. Man brauchte dabei die Stimme beim Sprechen gar nicht anzustrengen, sondern konnte mit gewöhnlicher Stärke aus einiger Entfernung an das Mikrophon heransprechen und doch auf einige Meilen mit Leichtigkeit den Schall übertragen.

Dieses einfache Kohlenmikrophon von Hughes wurde dann von anderen Konstrukteuren in verschiedenen anderen Formen hergestellt, und insbesondere wendete man und wendet man jetzt statt eines variablen Kohlenkontakts gern deren mehrere an. Solche Mikro-

phone kann man Stäbchenmikrophone nennen, zum Unterschied von den nachher zu beschreibenden Körnermikrophonen. Diese Mikrophone werden meistens in der Form konstruiert, welche ihnen zuerst von dem Franzosen Ader gegeben wurde. Bei diesem Mikrophon, dessen äußere Ansicht (mit angehängten Telephonen) Fig. 553 zeigt, ist das Mikrophon selbst in dem Kästchen enthalten, gegen dessen schräge Deckelplatte (aus Holz) man spricht. Fig. 554 zeigt das Mikrophon selbst geöffnet. In letzterer Figur sieht man, daß an dem Holzdeckel des Kastens drei dickere Kohlenstäbchen a b c befestigt sind, zwischen welchen je sechs Kohlenstäbchen E E lose aufliegen. Spricht man gegen den Deckel des Kastens, so kommen die Kohlenstäbchen alle in Schwingungen und bringen dadurch erhebliche Stromschwankungen hervor. Der Strom wird von dem Element in die eine äußere Kohle c eingeführt und geht von der anderen äußeren Kohle a in die primäre Spirale B und von dieser zurück zum Element. Die übrigen Vorrichtungen in der Figur, die Federn R und der Haken C, dienen zur selbsttätigen Einschaltung der Apparate, wie das weiter unten erklärt werden wird. Die Telephone zum Hören hängen, solange sie nicht benutzt werden, an den Haken des Mikrophonkästchens.

Fig. 553.

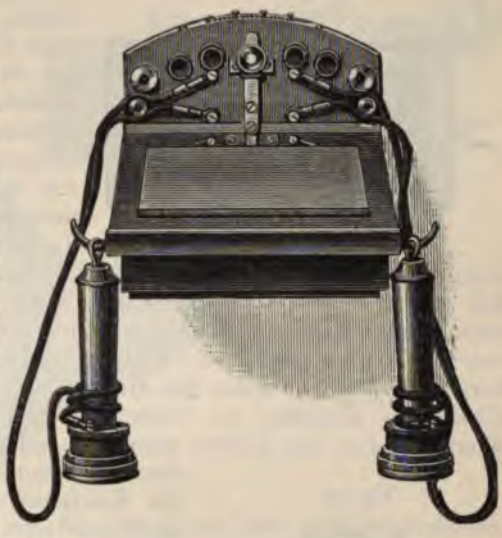
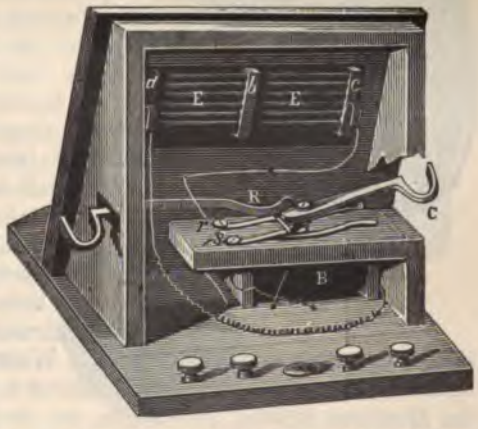


Fig. 554.

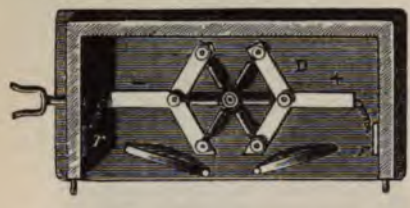


Man kann die Kohlenstäbchen noch in vielen anderen Formen anordnen, wie z. B. in Fig. 555, wo sechs Kohlenstücke radial in eine Mittelkohle eingelegt sind. Die Kohlen sind auf einer Holzplatte befestigt, welche den Deckel eines Kastens bildet, in welchem die Induktionsspiralen und die übrigen notwendigen Apparate liegen.

Nach dem Prinzip des Aderschen Mikrophons ist auch das bis vor kurzem von der deutschen Reichspost adoptierte eingerichtet, das in Fig. 556 von der Rückseite abgebildet ist. Dasselbe besteht aus einem

runden Kästchen, das vorn durch eine Holzplatte geschlossen ist, auf der ein Mundstück befestigt ist. Innen sind zwei senkrechte Kohlenklötzchen mit je drei Löchern vorhanden, zwischen denen drei bewegliche Kohlenstäbchen liegen. Dieselben sind durch je eine dünne Feder an die Sprechplatte angedrückt. In die beiden Kohlenklötze wird der Strom vom Element eingeführt.

Fig. 555.



Je mehr bewegliche Berührungspunkte zwischen den Kohlen vorhanden sind, desto größer sind die Stromschwankungen, die man durch das Sprechen erzeugen kann, und desto lauter wird also der übertragene Ton sein, resp. auf desto größere Entfernungen wird man sprechen können. Von diesem Gedanken ausgehend, hat zuerst Hunnings 1878 ein Mikrophon konstruiert, welches aus einer großen Zahl von Kohlenkörnern und zwar aus Koks bestand. Solche Körnermikrophone sind dann von verschiedenen Seiten hergestellt worden, wobei das Hauptaugenmerk darauf gerichtet war, die Übelstände derselben zu vermeiden. Es bilden sich nämlich an den Kontaktstellen der Kohlen allmählich infolge der Erwärmung durch den Strom Zusammenbackungen, die bewirken, daß die Kontakte sich verändern und daß man dann nur schwache Stromschwankungen bekommt. Auf die Güte und Unveränderlichkeit der Kontakte kommt aber alles an.

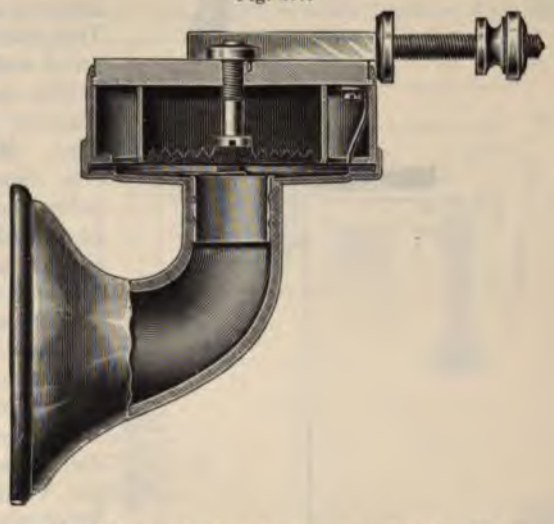
Fig. 556.

Das verbreitetste von diesen Körnermikrophonen ist der sogenannte Universaltransmitter von Berliner, der sich durch vorzügliche Wirkung auszeichnet, indem er nicht nur laut, sondern auch deutlich die Sprache und ihre Modulationen wiedergibt. Dieses Mikrophon ist in Fig. 557 im Durchschnitt dargestellt. Die Kohlenkörner, aus besonders präparierter Kohle bestehend, befinden sich bei ihm in dem engen Zwischenraum zwischen der Schallmembran, die hier selbst aus Kohle besteht, und der ausgezackten unteren Fläche eines Kohlenblocks. Das ganze System, Kohlenblock und Zwischenraum mit Kohlenkörnern bis zur Membran ist von einem Ring aus weichem Stoff umgeben. Wichtig ist die Lagerung der Kohlenmembran nach unten. Um trotzdem bequem sprechen zu können und die Membran kräftig zu erregen, ist an ihr ein gebogener Schalltrichter aus lackierter Papiermasse befestigt. Dieser Universaltransmitter, dessen äußere Ansicht Fig. 558 zeigt, wird mit vier bis fünf Leclanché-Elementen getrieben und gestattet die Sprache, insbesondere aber die Musik, laut und deutlich in einem großen Zimmer zu vernehmen.

In ähnlicher Weise sind die Körnermikrophone von Siemens & Halske

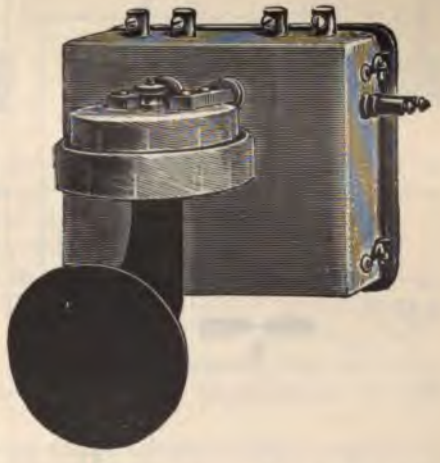
und von Mix & Genest eingerichtet, die jetzt von der deutschen Reichspost eingeführt werden. Die horizontale Lagerung der Kohlenmembran ist dabei nicht notwendig, da man durch einfaches Drehen des Kästchens, welches das Kohlenpulver enthält, das Zusammenbacken beseitigen kann.

Fig. 557.



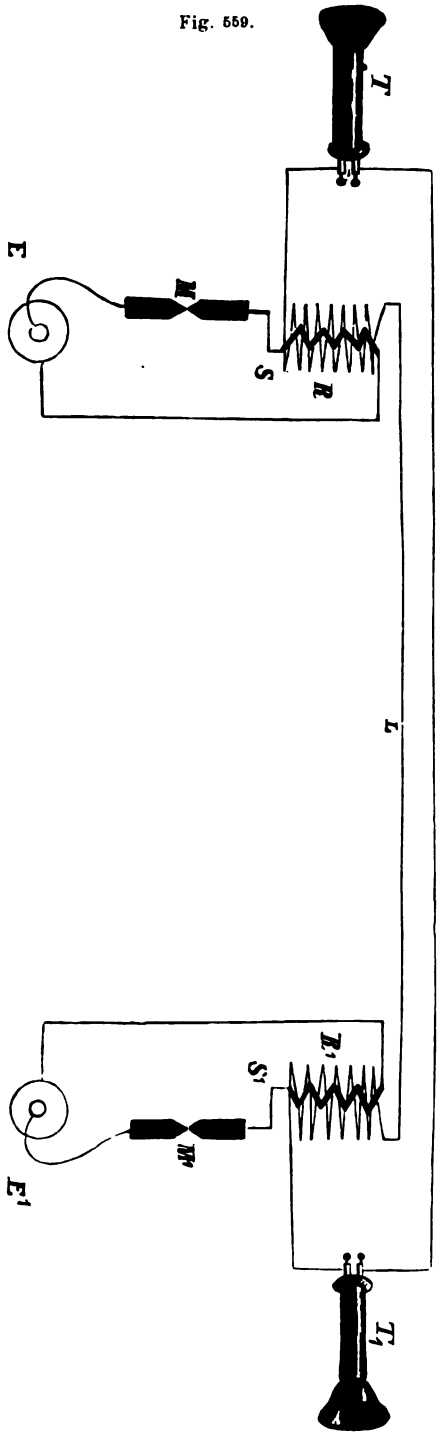
Sobald man ein Mikrophon anwendet, hat man also zum Hören und Sprechen zwei verschiedene Apparate: zum Sprechen das Mikrophon oder den Transmitter, zum Hören das Telephon. Jede von beiden Stationen muß dann ein Telephon und ein Mikrophon und für das letztere ein Element und ferner ein Paar Induktionsrollen haben, die gewöhnlich mit dem Mikrophon vereinigt sind. Die Verbindung ist dann derart, daß in jeder Station das Element durch das zugehörige Mikrophon und die primäre Rolle geschlossen ist, während die beiden Telephone und die zugehörigen sekundären Rollen auf beiden Stationen zusammen durch die Leitung verbunden sind.

Fig. 558.



In der Fig. 559 sind die primären Spiralen stark gezeichnet, die sekundären schwach. Die Verbindung ergibt sich dann aus der Figur einfach, in welcher M, M^1 die beiden Mikrophone, E, E^1 die zugehörigen Elemente, T, T_1 die beiden Telephone, S, S^1 und R, R^1 die primären und sekundären Induktionsspiralen sind, von denen die letzteren durch die Hin- und Rückleitung L miteinander verbunden sind. Die Rückleitung jedoch braucht nicht durch einen Draht zu geschehen. Nach der Entdeckung von Steinheil, die im vorigen Kapitel besprochen worden ist, ist es möglich, die Erde selbst als Rückleitung zu benutzen. Man verbindet das eine Ende jeder sekundären Spirale mit der Leitung, das andere mit dem Telephon und durch dieses mit der Erde, und braucht dann nur einen Draht zwischen den beiden Stationen und erspart also an Material und Kosten der Einrichtung.

Fig. 559.

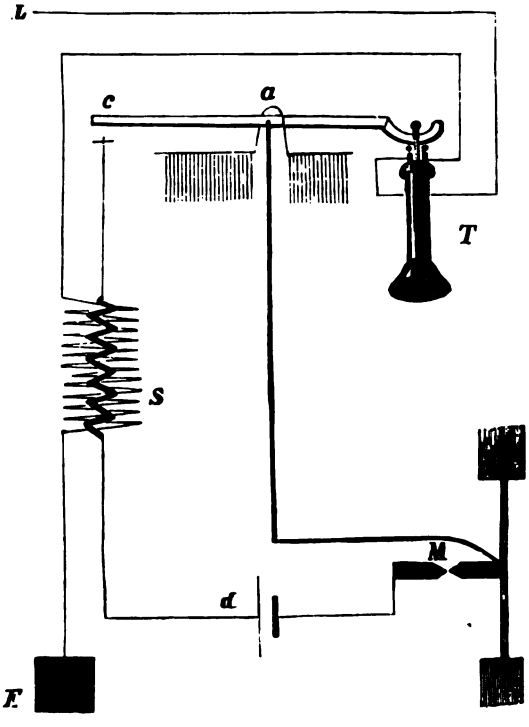


Als galvanische Elemente für die Mikrophonkreise nimmt man gewöhnlich Leclanché-Elemente, welche ausreichend stark und ausdauernd und billig sind. Wenn das Telephon und Mikrophon nicht benutzt werden, ist es natürlich angebracht, das Element zu öffnen, damit dasselbe weniger rasch verbraucht wird. Man hat dazu zweckmäßig eine automatische Einrichtung angebracht. Es wird nämlich das Telephon nach Beendigung des Gesprächs einfach an einen Haken gehängt und dadurch der Strom des Mikrophonkreises unterbrochen. Diese Einrichtung ist in Fig. 560 schematisch gezeichnet. Das Telephon T hängt an einem Haken und zieht durch sein Gewicht den Hebelarm a c in die Höhe und unterbricht dadurch die Verbindung bei c. Sowie das Telephon zum Hören von dem Haken heruntergenommen ist, wird die Verbindung bei c hergestellt. Dann geht der Strom von dem Element d durch die primäre (stark gezeichnete) Spirale zu c, dann durch a zum Mikrophon M und zum Element zurück. Die in der sekundären Spirale erzeugten Ströme gehen durch das Telephon T und durch die Leitung L zum Telephon der nächsten Station (welches auch von seinem Haken abgenommen ist), von dort in die Erde und durch die Erde nach E in die erste Station zurück.

Als man begann, das Telephon praktisch in den Verkehr einzuführen, sah man bald, daß es notwendig sei, zunächst vor jedem Gespräch ein lautes Zeichen zu geben, um anzuzeigen, daß telephoniert werden soll. Man benutzt deswegen jetzt bei den meisten Telephoneinrichtungen mit Mikrophon noch eine elektrische Klingel, die zuweilen durch eine besondere Batterie, gewöhnlich aber durch eine kleine magnetelektrische

Maschine, deren Anker man durch eine Kurbel dreht, betrieben wird. Man drückt an der Aufgabestation auf einen Knopf und schließt dadurch einen Stromkreis, in dem die Klingel der zweiten Station sich befindet. Der dazu nötige Strom wird eben durch die Drehung des Induktors geliefert. Dies ist das Anfangssignal für die zweite Station. Sobald dort der Angerufene sein Telephon an das Ohr hält, kann das Gespräch durch Mikrophon und Telephon geführt werden.

Fig. 560.



Für den praktischen Betrieb ergeben sich aber daraus sofort einige Forderungen. Der Strom von der Batterie oder dem Induktor der ersten Station zur Klingel der zweiten muß selbstverständlich durch den Leitungsdraht gehen, welcher die beiden Telephone miteinander verbindet, da man natürlich nicht eine besondere Leitung dafür legen will. Andererseits aber muß man vermeiden, daß der starke Strom von dieser Batterie resp. dem Induktor durch die Telephone selbst gehe, weil sonst deren Magnete zu stark erregt würden. Man mußte also eine Vorrichtung treffen, welche folgende Funktionen der Reihe nach leicht ausführte:

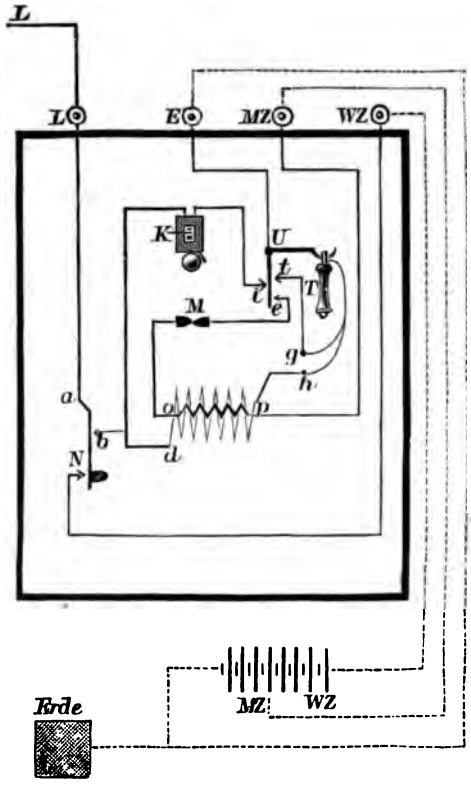
1. Einen Stromkreis zwischen der Batterie oder dem Induktor der ersten Station und der Klingel der zweiten zu schließen, ohne daß Mikrophon und Telephon eingeschaltet sind.
2. Diesen Stromkreis zu unterbrechen.
3. Auf beiden Stationen das Mikrophon mit seinem Element zu verbinden und zugleich die Telephone miteinander in Verbindung zu setzen.

Alle diese Funktionen mußten so ausgeführt werden, daß sie praktisch anwendbar sind, also von jedem Laien ohne physikalische Kenntnisse benutzt werden konnten.

Eine solche Einrichtung, wie sie bei vielen Telephonanlagen angebracht ist, zeigt Fig. 561. Es ist dabei angenommen, daß der Strom für die Klingeln durch eine Batterie, nicht durch einen Induktor geliefert wird. Für den letzteren Fall ergibt sich eine ganz ähnliche Schaltung. In der Figur ist das Telephon mit T, das Mikrophon mit M, die Klingel mit K bezeichnet. Die primäre Induktionsspule ist mit o p, die sekundäre mit d h bezeichnet.

Alle diese Teile, sowie der Taster und der Telephonhaken mit den nötigen Verbindungen sind durch eine dick gezeichnete Einrahmung eingeschlossen. Unterhalb des Rahmens ist eine Batterie gezeichnet, deren positiver Pol (Kohle) mit der Erde verbunden ist, während das Zink des Endes und ein Zink aus der Mitte mit den Klemmen W Z und M Z oberhalb der Umrahmung verbunden sind. Zwei weitere Klemmen, mit E und L bezeichnet, führen, die erste zur Erde, die zweite zur Leitung nach der entfernten Station.

Fig. 561.



Das Telephon T hängt zuerst auf beiden Stationen an einem Winkelhebel, der um den Punkt U drehbar ist. Durch das Gewicht des Telephons wird dieser Hebel so gestellt, daß die Verbindungen mit t und e, welche zum Stromkreis des Mikrophons und Telephons gehören, unterbrochen sind. Dagegen wird durch den Hebel eine leitende Verbindung mit i hergestellt und von diesem aus durch die Klingel K mit b, welches an dem Druckknopf N, wenn er nicht gedrückt ist, anliegt. Wenn dieser aber gedrückt wird, so macht er mit N Verbindung. Sobald man also auf den Knopf drückt, geht ein Strom von dem Pol W Z der Batterie durch die obere Klemme W Z, dann durch N, a zur Leitung L. Von dieser zu dem L und a der nächsten Station (in welcher auch das Telephon an dem Haken hängt) und dort durch b (da ja dort der Druckknopf nicht gedrückt ist) zu der dortigen Klingel K, dann durch i, U, E zur Erde und durch die Erde zur ersten Station zurück.

Dadurch ertönt also die Klingel der zweiten Station und die erste Funktion ist dadurch erfüllt: die Klingel der entfernten Station ist in Tätigkeit, ohne daß durch die Telephone und Mikrophone ein Strom geht.

Nun werden auf beiden Stationen die Telephone von den Haken abgenommen. Dadurch wird die Verbindung mit i unterbrochen. Die Klingeln K sind also dadurch ausgeschaltet.

Dagegen werden nun t und e durch den Hebel miteinander und durch U mit der Erde verbunden. Dadurch ist jedes Mikrophon mit seiner Batterie in Verbindung gesetzt und zugleich sind die Telephone durch die Leitung L miteinander verbunden. Denn von dem Pol M Z der Batterie geht der Strom jetzt durch die obere Klemme M Z zur primären Spirale p o,

von dort durch das Mikrophon M nach e und durch U, E zur Erde, zu welcher auch der andere Pol der Batterie abgeleitet ist. Zugleich gehen von der sekundären Spirale die induzierten Ströme durch h, d, b, a in die Leitung L zum Punkt b der zweiten Station, und dort durch d zu der dortigen sekundären Spirale, dann durch h zu dem dortigen Telephon T und durch g, t zur Erde. Von der Erde kommt der Strom zur Erdplatte E der ersten Station zurück und geht dann aus dieser durch t in das Telephon T und dann zur sekundären Spirale d zurück.

Fig. 562.

Damit ist also erreicht, was beabsichtigt war. Die Klingel funktioniert, ohne das Telephon zu beeinflussen, und Telephon und Mikrophon funktionieren, ohne daß die Elemente der Klingeln geschlossen sind.

Man braucht nichts weiter vorzunehmen, als auf den Taster zu drücken und dann das Telephon von seinem Haken zu nehmen und zu sprechen.

Zum Zwecke des deutlicheren Hörens bringt man gewöhnlich auf jeder Station zwei Telephone an, die entweder hintereinander oder nebeneinander geschaltet sind.

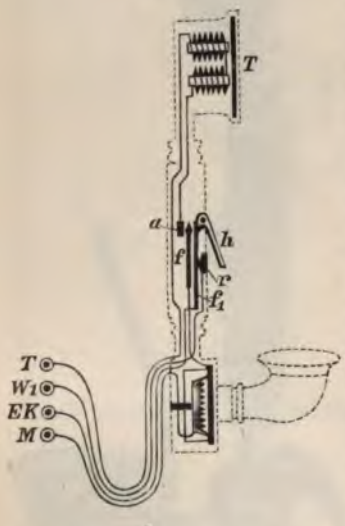
Die drei Apparate, Telephon, Mikrophon und Klingeln, sind gewöhnlich in einem Kästchen vereinigt. Zunächst braucht man für jeden der drei Apparate zwei Leitungen, im ganzen also sechs. Da aber die Leitung, die die Telephone der beiden Stationen verbindet, zugleich die Klingeln verbindet, und da die Rückleitung durch die Erde geschieht, so fallen zwei Leitungen fort und jedes solche Kästchen erhält nur vier Anschlußklemmen. In Fig. 561 sind sie mit W Z (Weckerzink), M Z (Mikrophonzink), E K (Erdkohle) und L (Leitung) bezeichnet. Die Batterie für die Klingel braucht mehr Elemente als die für das Mikrophon, man nimmt daher für das letztere einige Elemente der ganzen Batterie, deren einer Pol (Kohle) zur Erde abgeleitet ist, wie es in derselben Figur gezeichnet ist.

Um die Benutzung des Telephons mit Mikrophon bequem zu machen, ist man dazu übergegangen, Apparate zu konstruieren, bei welchen man das Telephon und Mikrophon zusammen bewegen kann und welche man auf Schreibtischen, Nachttischen u. s. w. benutzen kann. Ein solches Mikrotelephon (von Mix & Genest) zeigt Fig. 562, und aus Fig. 563

ist die Schaltung zu erkennen. Dasselbe ist so eingerichtet, daß man zu gleicher Zeit das Telephon vor das Ohr und das Mikrophon vor den Mund halten kann. Dieselben werden als Tischtelephone, wie Fig. 564 zeigt, auf einem Gestell angebracht, das noch eine Klingel und den zugehörigen Druckknopf enthält. Die vier Leitungsdrähte vom Mikrotelephon sind in einer Leitungsschnur vereinigt, die zu einer Rosette an der Wand führt, an welcher die nötigen Verbindungen mit der Batterie, der Erde und der Fernleitung ausgeführt werden. An dem Untersatz in der Figur sind noch 10 Kontaktstücke und ein drehbarer Kontakthebel sichtbar, die den weiter unten zu besprechenden Linienwähler bilden.

Das Telephon ist ein außerordentlich empfindliches Instrument. Sein Fehler ist nicht, daß es zu wenig von kleinen Wirkungen beeinflußt wird, sondern vielmehr, daß es auf sie zu viel reagiert. Nicht bloß die überaus kleinen Schwingungen, welche durch das Sprechen in der Membran erzeugt werden und welche so überaus schwache elektrische Ströme hervorbringen, erregen das Telephon, so daß es sie an der anderen Station wiedergibt, sondern auch jede andere geringe Störung des elektrischen Gleichgewichts bringt ein Telephon in Anregung. Infolgedessen kann man nicht ohne weiteres Telephonleitungen neben die Telegraphenleitungen legen oder gar die Telegraphenleitungen selbst für das Telephon benutzen. Denn jede Depesche, die durch einen Telegraphendraht gesendet wird, und welche ja in aufeinanderfolgenden Öffnungen und Schließungen eines Stromes besteht, jede Depesche induziert in dem danebenliegenden Telephondraht eine Reihe von Strömen, und das Telephon kommt zum Tönen. Man kann, wenn man ein Telephon ans Ohr hält, dessen Leitung neben einer Telegraphenleitung liegt, genau hören, wie nebenbei telegraphiert wird, und wer die Bedeutung der einzelnen telegraphischen Stromöffnungen und -schließungen kennt, kann infolgedessen hören und verstehen, was daneben telegraphiert wird. Telephonleitungen neben oder auf verkehrsreichen Telegraphenleitungen sind also viel zu bedeutenden Störungen ausgesetzt, als daß man sie ohne weiteres benutzen könnte. Deshalb fing man zuerst in Amerika an, das Telephon nicht als Konkurrenten des Telegraphen, sondern als Ergänzung desselben zu benutzen. Man wendete das Telephon an für den inneren persönlichen Verkehr in den einzelnen Städten selbst, und diese Anwendung hat sich von dem allergrößten Nutzen gezeigt. Nach amerikanischem Muster wurde bald auch in Deutschland das Telephon hauptsächlich in den großen Städten für den inneren Verkehr eingerichtet. Außerdem wurde es für die Vermittelung von Nachrichten nach kleinen Nebenstationen, die keine telegraphische Einrichtung haben, von der Reichspostverwaltung eingeführt. Erst all-

Fig. 563.



mählich gelang es, den Telephonverkehr auch auf weite Entfernungen zwischen verschiedenen Städten auszudehnen. Die Anordnungen zum Verbinden zweier Stationen sind naturgemäß verschieden, je nach der Anzahl der verschiedenen Sprechverbindungen, die gewünscht werden können und je nach der Entfernung der Stationen. Es haben sich verschiedene Einrichtungen als zweckmäßig erwiesen, je nachdem es sich darum handelt, nur zwischen einer kleinen Anzahl von Stellen, wie z. B. den verschiedenen

Fig. 564.

Bureaus einer Fabrik Verbindungen herzustellen, oder zwischen allen Telephonabonnenten in einer Stadt, oder endlich zwischen den Telephonabonnenten verschiedener Städte.

Wenn eine Anzahl Telephone, z. B. in den verschiedenen Bureaus eines Amtes oder einer Fabrik, aufgestellt sind und die Teilnehmer nach Belieben miteinander verkehren sollen, ohne Hilfe eines Umschaltebeamten, so verbindet man mit den Telephonen einen Linienwähler, wie ihn Fig. 565 zeigt. Bei jedem Telephon ist ein solcher vorhanden. Er enthält so viel Kontakte, als Sprechstellen vorhanden sind, mit denen das Telephon in Verbindung gebracht werden kann. Die Einrichtung und Schaltung ist dabei deutlich aus Fig. 566 zu erkennen. In dieser sind 4 Stationen angenommen. In jeder befindet sich eine Batterie, ferner ein Mikrophontelephonapparat mit 4 Anschlußklemmen L, E K, M Z, W Z (s. o. S. 619) und ein Linienwähler mit je 3 Kontakten. Will z. B. Station 3 mit Station 1 sprechen, so braucht nur Station 3 einen Stöpsel in das Loch 1 seines Linienwählers zu stecken, dann ist die Leitung zwischen

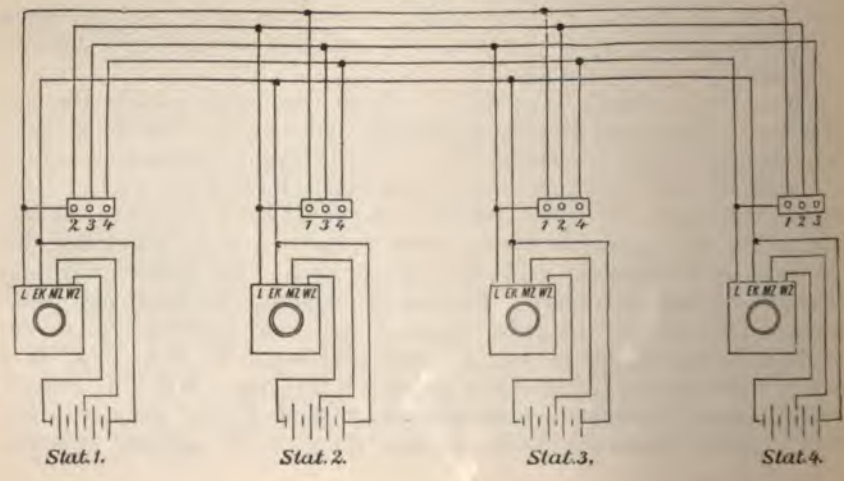
Fig. 565.

1 und 3 hergestellt. Zur Verbindung der 4 Stationen sind hier 5 Drähte angewendet. Man könnte mit 4 Drähten auskommen, wenn man jede Station mit der Erde verbinden würde. Ebenso sind für 10 Stationen 10 resp. 11, für 30 Stationen 30 resp. 31 Drähte erforderlich, um sie so durch Linienwähler miteinander zu verbinden. In dem oben Fig. 564 dargestellten Tischtelephon ist der Linienwähler mit den nötigen Verbindungen gleich an den Untersatz des Apparates selbst angebracht. Statt durch einen Stöpsel wird dabei durch eine drehbare Kurbel der Kontakt hergestellt.

Für den inneren Stadtverkehr ist es bei einer einigermaßen großen Zahl von Teilnehmern notwendig, ein Vermittelungsamt einzurichten, durch welches der gesamte Verkehr vermittelt wird. Denn sonst müßte jeder Teilnehmer mit jedem anderen eine besondere Verbindungsleitung haben, was, abgesehen von den Kosten, eine Unmöglichkeit wäre wegen der vielen Drähte, die über und in die Häuser führen müßten.

Deswegen geht von jedem Teilnehmer ein Draht zu dem Zentralbureau, und diesem Bureau fällt die Aufgabe zu, immer, wenn es an-

Fig. 566.

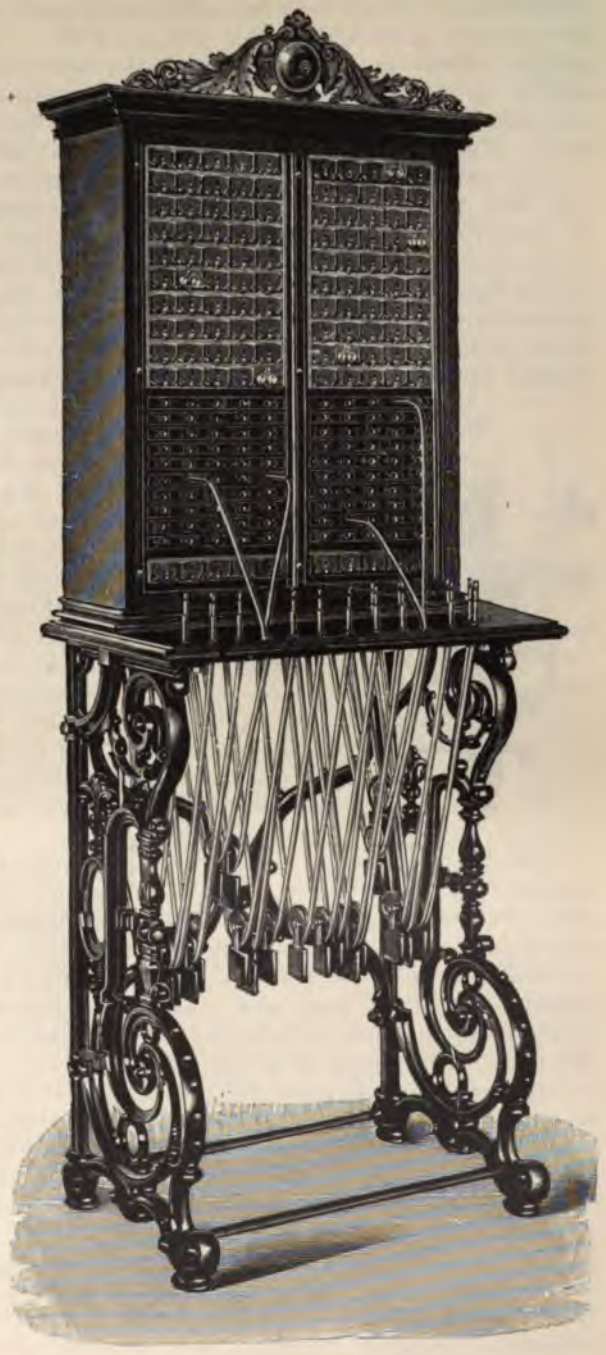


gerufen wird, je zwei Teilnehmer miteinander in Verbindung zu bringen. Das Vermittelungsamt muß also im stande sein, jeden Anruf zu hören, aus welcher Leitung er auch komme, in jede dieser Leitungen selbst zu sprechen und je zwei Leitungen miteinander zu verbinden.

Es lassen sich natürlich auf verschiedenfache Weise Einrichtungen angeben, welche diese Verbindungen in bequemer Weise zu machen gestatten. Ein sehr verbreitetes System für solche Vermittelungsämter ist das Klappensystem, welches wir mittels Fig. 567 u. 568 beschreiben wollen.

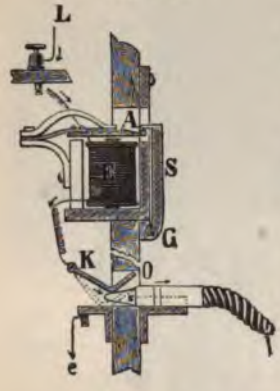
In dem Vermittelungsamt ist nämlich eine Reihe Schränke von der Form der Fig. 567 aufgestellt. Jeder dieser Klappenschränke enthält die Apparate für 50 bis 150, in der Figur für 100 Teilnehmer am Telephonverkehr, und zwar befindet sich für jeden Teilnehmer in diesem Schrank ein Elektromagnet, der direkt mit der Linienleitung von dem betreffenden Abonnenten verbunden ist.

Fig. 567.



In Fig. 568 ist ein solcher Elektromagnet E gezeichnet, zu dem die Linienleitung L führt, und der andererseits durch den Winkelhebel K in der punktiert gezeichneten Lage mit der Erde e in Verbindung ist. Sobald der Abonnent seinen Taster drückt, also seine Klingelbatterie einschaltet, geht der Strom von L durch E hindurch zur Erde, der Anker A wird angezogen und läßt dabei eine Klappe S fallen, welche sich um G dreht. Hinter der Klappe ist die Nummer des Abonnenten angebracht, so daß man im Zentralbureau sofort weiß, welcher Abonnent sprechen will. Man sieht die Klappen in Fig. 567 im oberen Teil des Schrankes. Zu jeder Klappe gehört nun im unteren Teil des Klappenschrankes ein Loch, welche in Fig. 567 mit den Ziffern 1 bis 100 bezeichnet sind, während eines in Fig. 568 bei O dargestellt ist. Nun kann der Beamte in das Loch O, in welches der Winkelhebel K hineinragt, eine metallische Spitze s einführen, welche das eine Ende einer aus Metalldrähten gebildeten Leitungsschnur l ist. Dadurch hebt er K in die Höhe, unterbricht damit die Verbindung mit der Erde und stellt vielmehr eine Verbindung der Linienleitung L mit der Leitungsschnur her. Mit dieser Leitungsschnur ist nun der Telephonapparat des Beamten verbunden, so daß dieser jetzt mit dem Anrufenden direkt verkehren und erfahren kann, mit wem dieser sprechen will. Hat er so die Nummer des Anzurufenden gehört, so klingelt er diesen an und nimmt dann eine von den an der Tischplatte des Apparates hängenden Leitungsschnüren, deren jedes Ende eine solche metallische Spitze hat, und steckt diese Spitzen in dasjenige Loch, das der anrufenden, und in dasjenige, das der angerufenen Nummer zugehört. Dadurch sind die beiden Abonnenten verbunden und können sich nun unterhalten.

Fig. 568.



Der Klappenschrank enthält daher in seinem oberen Teil 100 Elektromagnete mit den Klappen. Darunter sind 100 Löcher angebracht, für jeden Elektromagneten eins. Die Stöpsel hängen, durch Gewichte mit Rollen gespannt, an der Tischplatte des Schrankes. Die weiteren 10 Klappen unterhalb der Löcher dienen einem besonderen Zweck, den hier auseinanderzusetzen zu lang wäre. Jeder Klappenschrank kann mit dem nächsten durch Drähte verbunden werden, so daß die Verbindung zwischen beliebigen Teilnehmern hergestellt werden kann.

In dieser und ähnlicher Weise werden Vermittelungsämter eingerichtet. Durch diese zweckmäßige und einfache Einrichtung hat sich das Telephon seit der kurzen Zeit seiner Einführung (seit Ende 1877) in Deutschland einen außerordentlich ausgedehnten und stetig wachsenden Anwendungskreis erobert und ist zu einem fast unentbehrlichen Verkehrsmittel geworden. Man hat sich vielfach bemüht, die menschliche Tätigkeit in einem Vermittelungsamt entbehrlich zu machen, und a u t o m a t i s c h e, durch Elektrizität vermittelte, Verbindungen je zweier beliebiger Abonnenten herzustellen. Natürlich ist das ein äußerst schwieriges Problem, sobald es sich um eine größere Anzahl von Teil-

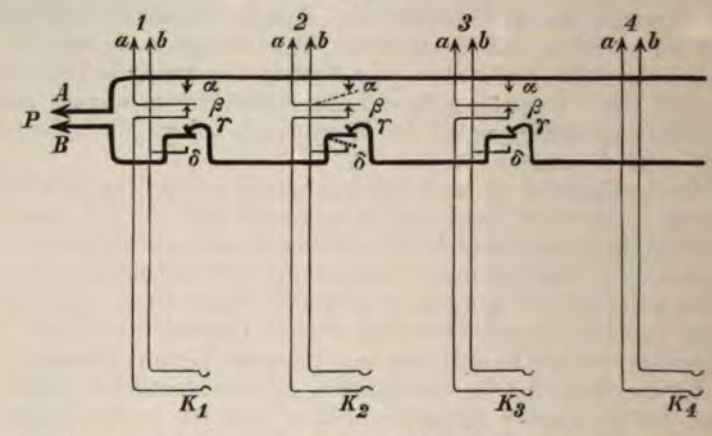
nehmern handelt. Mit einem solchen System, dem Strowgerschen, werden augenblicklich noch Betriebsversuche bei der Reichspost gemacht.

Die Klappenschränke werden übrigens nicht bloß in den Vermittelungsämtern für den ganzen Stadtverkehr gebraucht. Auch in großen Fabriken, Banken, Ämtern, wo oft Hunderte von Einzelpersonen abwechselnd miteinander zu sprechen haben, werden solche Klappenschränke zur Vermittelung aufgestellt, gewöhnlich beim Portier, der dann die Verbindungen auszuführen hat. Gegenüber dem Linienwählersystem erspart bei einer großen Zahl von Sprechstellen das Klappenschranksystem bedeutend an Leitungs- und Apparatkosten.

In Deutschland ist es nach Reichsgesetzen erlaubt, an jede amtliche Sprechstelle noch fünf Nebenstellen anzuschließen, so daß jede dieser Nebenstellen direkt mit dem Amt verkehren kann, falls die Einrichtungen so getroffen sind, daß nur diese Nebenstellen (für welche Gebühr gezahlt wird) und keine andere sich mit dem Amt in Verbindung setzen können. Aus dem Gesetzesdeutsch in verständliches Deutsch übertragen besagt das folgendes. Eine Fabrik, die ein privates Vermittelungsamt, etwa für 60 Bureaus hat, und die eine Leitung zu dem staatlichen (Post-) Amt hat, darf bis zu 5 dieser Bureaus mit Einrichtungen versehen, daß diese auf der einen Leitung direkt mit dem Postamt verkehren können, wenn dafür gesorgt ist, daß keine unerlaubte Verbindung gemacht werden kann, daß also nicht eins von den anderen 55 Bureaus sich durch Stöpselverbindung oder Leitungsumschaltung mit dem Amt in Verbindung setzen kann. Dieser Forderung genügt (unter anderen) ein Schaltersystem, welches von der Aktiengesellschaft Mix & Genest eingeführt wurde, und welches sie als Janussystem bezeichnet, in Anknüpfung an den altitalischen Gott, der mit zwei Gesichtern, einem freundlichen und einem finstern dargestellt wurde. Ein Janustelephon kann eben auch sowohl mit dem gestrengen staatlichen Amt, wie mit der gemütlichen Privatvermittelungsstelle in Verbindung gesetzt werden und da unsere Techniker immer weniger von klassischer Bildung aufnehmen, ist es ganz erfreulich, daß hie und da einmal eine klassische Reminiszenz in der Technik auftritt. Trotz des klangvollen Namens ist die Sache, die damit bezeichnet wird, übrigens sehr einfach. Es handelt sich nur um eine Umschaltung eines Apparates auf die eine oder andere Leitung, die nicht mißbräuchlich ausgenutzt werden kann. Aus Fig. 569 wird dieselbe hervorgehen. In dieser ist angenommen, daß in einem Klappenschrank eine Anzahl von Doppelleitungen von den Nebenstellen 1, 2, 3, 4 zu Klinken K_1, K_2, K_3, K_4 führen, wo sie durch Schnüre von dem Privatvermittler (Portier) beliebig verbunden werden können. Die beiden Leitungen sind als a und b unterschieden. Senkrecht zu den Drähten a b führen nun die Drähte A B der Postleitung. An jedem von den Nebenstellen 1, 2, 3, die mit dem Amt verkehren sollen, ist nun ein Schalter angebracht, eben der Janusschalter. Die Leitung b führt nämlich jedesmal direkt zur Klinke, und von ihr sind abgezweigt die Kontakte δ, die Leitung a aber führt zunächst zu einem Kontakte β, und dann erst zur Klinke. Von den beiden Kontakten δ und β ist immer einer wirksam (Arbeitskontakt), wenn der andere unbenutzt ist (Ruhekontakt). Umgekehrt zweigen von der Post-

leitung A, die sonst direkt durch den Klappenschrank geht, die Kontakte α ab, während die Leitung B über die Kontakte γ führt. Der Janusschalter, der an jeder dieser Stellen 1, 2, 3 am Telephon angebracht ist, bringt nun

Fig. 569.



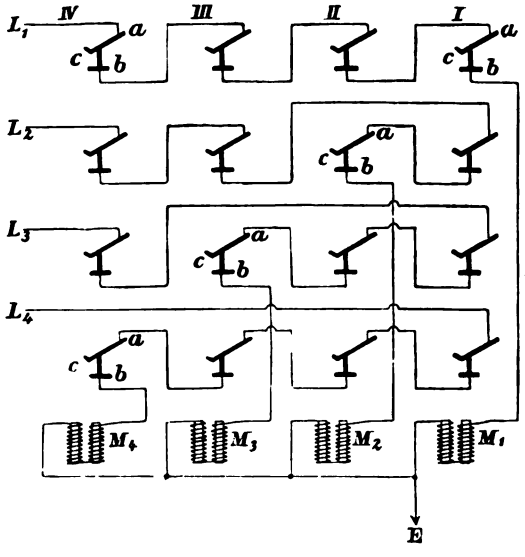
die entsprechenden Leitungen einmal an die Kontakte β und γ, das andere Mal an α und δ. An der Nebenstelle 2 ist die zweite Schaltung punktiert gezeichnet. Sind die Leitungen so geschaltet, wie an den Stellen 1 und 3, so ist die Amtleitung jedesmal nicht eingeschaltet, weil bei α kein Kontakt gemacht ist, dagegen können diese Nebenstellen unter sich durch die Klinken K verkehren. Wird aber der Schalter umgelegt, wie in Nebenstelle 2, so daß α mit a und dadurch mit A, und B mit δ und dadurch mit b verbunden ist, so kann die Stelle mit dem Amt verkehren. Aber keine andere Nebenstelle kann während der Zeit mit 2 und dadurch mit dem Amt verkehren, denn die Klinke K_2, die ja mit β verbunden ist, ist abgeschaltet. Auf diese einfache Weise ist jeder Mißbrauch beseitigt. Nur durch Umänderung des ganzen Apparates, den man aber bei einer Kontrolle sofort erkennen würde, könnte eine mißbräuchliche Verbindung gemacht werden. Die Umschaltung auf Amt oder Haustelephon wird durch einen Schalter mit Knopf von der Form bewerkstelligt, wie sie in Fig. 570 gezeichnet ist. Durch Drehen des Knopfes wird die eine oder andere der beschriebenen Verbindungen ausgeführt. Dieselbe Einrichtung läßt sich auch bei Linienwählern ausführen.

Fig. 570.

Das einfache Klappenschranksystem eines Vermittelungsamtes, wie es oben geschildert wurde, wird aber sofort umständlich, sowie an das Vermittelungsamt sehr viele Teilnehmer angeschlossen sind. Sind z. B. 2000 Teilnehmer vorhanden, so braucht man 40 Klappenschränke, zwischen denen eine Anzahl Leitungen zur Verbindung angebracht sein müssen. Wenn nun ein an den ersten Schrank angeschlossener Teilnehmer mit einem etwa an den 30ten angeschlossenen zu sprechen wünscht, so muß der Beamte des ersten

Schranks dem entfernten Beamten den Auftrag geben, die dortige Verbindung herzustellen. Und offenbar kommt es bei großer Zahl der Teilnehmer viel öfter vor, daß zwei verschiedene Klappenschränke verbunden werden müssen, als daß gerade zwei Teilnehmer desselben Schranks miteinander sprechen wollen. Diesen Übelstand, daß nicht ein Beamter die notwendigen Verbindungen allein ausführen kann, sondern einen zweiten dazu braucht, suchte man zu vermeiden, und es gelingt das durch das sogenannte Multiplexsystem oder den Vielfachumschalter. Von diesen hat sich als ein sehr zweckmäßiger unter anderen der von Mix & Genest in Berlin erwiesen, der in Deutschland jetzt vielfach eingeführt ist. Das Prinzip der Vielfachumschalter ist eigentlich ganz einfach. Es wird nämlich die Leitung, die von einem Teilnehmer kommt, nicht direkt zu seinem Klappenschrank geführt, sondern sie wird zunächst bei allen anderen Klappenschränken vorbei oder eigentlich durch sie hindurchgeführt und gelangt erst zuletzt zu seinem eigenen Klappenschrank, wo sie in gewöhnlicher Weise mit dem Elektromagnet und der Klinke verbunden ist, wie vorher beschrieben. Dadurch nun, daß jede Leitung bei allen Klappenschränken vorbeigeführt wird, kann man jetzt leicht die Einrichtung so treffen, daß sie an jedem einzelnen Klappenschrank einen beweglichen Teil, eben wieder eine solche Klinke (aber keinen Elektromagnet) erhält, in die man einen Leitungsstöpsel einstecken kann. Jeder Beamte hat nun an seinem Klappenschrank 200 Elektromagnete mit ihren Klinken, die er zu bedienen hat, außerdem aber befinden sich an seinem Schrank (bei 2000 Teilnehmern) noch 1800 Löcher, die eben die Klinken (aber nicht Elektromagnete) für alle anderen Teilnehmer enthalten. Ein Amt für 2000 Abonnenten besteht daher aus 10 Schränken, von denen jeder 200 Elektromagnete (mit ihren Klappen) und 200 + 1800 Löcher mit ihren Klinken besitzt. Die Leitungsführung ist schematisch in Fig. 571 gezeichnet. Die mit I, II, III, IV überschriebenen vertikalen Kolonnen stellen 4 Klappenschränke dar. Es bedeutet L_1 eine Leitung, die an den ersten Klappenschrank angeschlossen ist (also an eine Nummer zwischen 1 und 200). Diese Leitung führt aber, wie man sieht, erst zu der Klinke a b im Schranke IV, dann von dort aus zur Klinke in Schrank III, von dort zur Klinke in Schrank II, dann erst zur eigentlichen Klinke in Schrank I und von dort in ihren

Fig. 571.



Elektromagneten M_1 und zur Erde E. Ebenso führt die Leitung L_2 eines Abonnenten mit einer Nummer zwischen 201 und 400 erst zu einer Klinke in Schrank IV, dann zum Schrank III, dann zu I und dann endlich zu ihrer eigentlichen Klinke in Schrank II, von dort zum Elektromagneten M_2 und zur Erde. Und so fort. Nun sieht man, daß jeder Beamte an seinem Schrank alle beliebigen Verbindungen vornehmen kann. Wird z. B. der Beamte am Schrank IV gerufen (also von einem Abonnenten mit einer Nummer zwischen 601 und 800), so fällt die Klappe am Elektromagneten M_4. Der Abonnent will mit einem bestimmten Teilnehmer sprechen, der an Schrank I angeschlossen sei (1—200, z. B. mit demjenigen, dessen Leitung L_1 gerade gezeichnet ist. Nun steckt der Beamte die Stöpsel an seinem eigenen Schrank in die beiden Löcher mit der betreffenden Nummer und die Verbindung ist fertig. Denn es geht der Strom von der Leitung L_4 zur Klinke b a in der untersten Reihe des Schrankes IV, die durch den Stöpsel unterbrochen ist, durch den Stöpsel zur Klinke b a in der obersten Reihe desselben Schrankes IV, die ebenfalls unterbrochen ist, und durch die Leitung L_1 zum gewünschten Abonnenten. So weit ist die Anordnung zwar umständlich (weil in unserem Beispiel von 2000 Abonnenten an jedem Schrank 2000 Klinken, im ganzen also 10×2000 Klinken, bei 6000 Abonnenten sogar 30×6000 angebracht werden müssen), aber einfach zu verstehen. Es muß aber noch Vorsorge getroffen werden, daß ein Beamter sofort merkt, ob ein Abonnent, dessen Klappe er nicht an seinem Schrank hat, etwa schon spricht. Dies wird bei dem Vielfachumschalter von Mix & Genest dadurch erkannt, daß in diesem Fall, wenn also dessen Klappe gefallen ist, ein Strom durch die Leitung geschickt wird, der sich durch den Ausschlag eines Galvanometers anzeigt. Wir können aber auf diese Einzelheiten nicht eingehen.

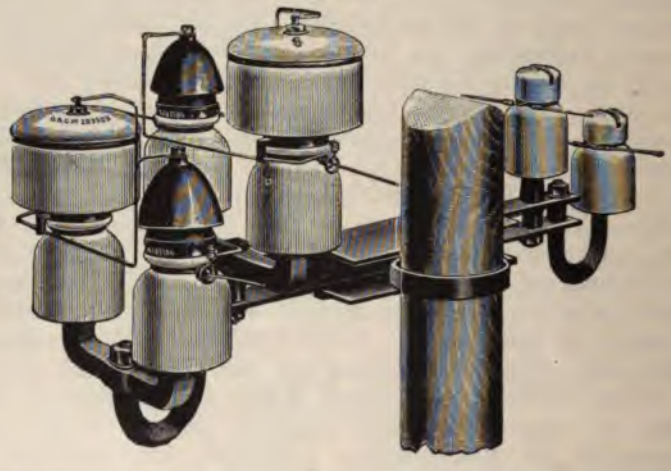
Während so der telephonische Verkehr innerhalb der Städte sich sehr intensiv entwickelte, entstand naturgemäß bald das Verlangen, auch getrennte Städte miteinander so zu verbinden, daß jeder Telephoninhaber der einen Stadt mit jedem der anderen Stadt beliebig sprechen könnte, also einen interurbanen Telephonverkehr einzurichten. Diese Verbindung fand aber zuerst große Schwierigkeiten. Wenn die Leitung zwischen beiden Städten in der Nähe der Telegraphenleitungen geführt werden sollte, so wirkte die Induktion der Telegraphierströme auf das Telephon und machte jedes Verstehen unmöglich. Diesen Übelstand aber vermeidet man einfach und sicher dadurch — und die telephonischen Städteverbindungen werden jetzt allgemein so eingerichtet —, daß man die beiden Städte nicht durch einen einzigen Draht, sondern durch eine sogenannte Schleife, eine hin- und zurückführende Leitung verbindet. Dadurch werden die Telephone fast unempfindlich gegen äußere Einflüsse. Wenn nämlich irgendwo von außerhalb ein Strom in dem einen Draht induziert wird, so wird zugleich durch dieselbe Ursache in dem danebenliegenden zweiten Draht ein Strom in derselben absoluten Richtung induziert. Diese beiden Ströme fließen also in der Hin- und Rückleitung gegeneinander und heben sich daher auf. Die Telephone merken nichts davon. Die beiden Leitungen müssen natürlich auf denselben Stangen geführt werden. Auf jeder Station werden bei der Fernleitung die beiden Enden der sekundären Telephonspulen mit den

beiden Linienleitungen (also nicht das eine Ende mit der Erde) verbunden. Bei dieser Doppelleitung oder, wie man es nennt, Schleifenleitung ist es nun möglich, auf gewöhnlichen Telegraphendrähten einige Hundert Kilometer weit zu telephonieren. Bei größeren Entfernungen aber hat es sich gezeigt, daß man mit Leitungen aus Eisen keine Wirkungen mehr erzielt, der Widerstand gegen die Wechselströme, die Impedanz (S. 246) wird zu groß und die Ströme werden zu sehr geschwächt. Mit Leitungen aus Kupfer oder Bronze kommt man viel weiter. Durch die Anwendung von Schleifenleitungen aus Kupfer oder Bronze ist es tatsächlich gelungen, schon auf sehr weite Entfernungen zu telephonieren. In Amerika ist die Verbindung von New York nach Chicago auf mehr als 1500 km ausgeführt. In Deutschland kann man von Breslau nach Hamburg, oder von München nach Berlin auf 650 km, in Österreich von Prag nach Budapest auf mehr als 600 km sprechen, und es besteht jetzt sogar eine telephonische Verbindung von London über Paris nach Marseille, welche bisher wohl die längste Fernsprechverbindung in Europa ist.

Und dieses System der telephonischen Fernverbindungen breitet sich stets weiter aus. Große Industriebezirke, bedeutende Handelsstädte werden miteinander telephonisch verbunden, und das Ende dieser Einrichtungen dürfte erst dann erreicht sein, wenn jeder Mensch aus irgend einer Groß- oder Mittelstadt Europas mit jedem anderen in derselben Lage sich telephonisch wird unterhalten können. Je länger allerdings die Strecken sind, auf welche telephoniert werden soll, desto stärker werden die Ströme durch die Leitung geschwächt und desto dickere Drähte muß man zunächst anwenden. Die Schwächung der Telephonströme aber beruht auf zwei Ursachen. Erstens auf dem Widerstand der Leitung, durch welchen die Energie in Joulesche Wärme verwandelt wird. Zweitens aber noch auf einem besonderen Umstand, der bei langen Leitungen und namentlich bei unterirdischen Leitungen sich bemerkbar macht und der in der Telegraphie schon lange erkannt war. Jedes Kabel besteht ja aus einer inneren Seele, einer darum liegenden isolierenden Schicht und einem um diese Schicht liegenden Leiter (Blei, Wasser, feuchte Erde u. s. w.). Es verhält sich also ein Kabel in dieser Beziehung wie ein Kondensator (S. 26). Aber auch eine freie Luftleitung kann als eine Art Kondensator angesehen werden. Der Draht selbst ist die eine Belegung, die Luft ist die isolierende Zwischenschicht und der Erdboden, resp. die in der Nähe des Drahtes befindlichen Stangen und Eisenteile derselben sind die andere Belegung. Daraus ergibt sich, daß jede Kabelleitung, aber auch jede Freileitung Kapazität besitzt. Gehen nun Ströme durch eine solche Leitung, so laden sie den Kondensator, auf der freien Oberfläche des Drahtes sammelt sich Elektrizität an. Wenn nun Wechselströme in dem Draht fließen, wie es die Telephonströme sind, so wird der Kondensator auch abwechselnd entgegengesetzt geladen und entladen, es treten also noch solche hin und her gehende Ladungs- und Entladungsströme auf, welche für die eigentliche Tonübermittelung schädlich sind. Sie bringen nämlich Phasenänderungen in dem Strom hervor, wodurch die Klangfarbe der übertragenen Laute verändert wird und zum Teil bis zur Unverständlichkeit verzerrt wird. Diese Wirkung macht sich nur auf langen Leitungen merklich, ist aber da im stande die ganze tele-

phonische Übertragung unmöglich zu machen. Diese Wirkung aber kann man dadurch verringern, daß man in die Leitung in bestimmten Abständen Rollen einsetzt, welche Selbstpotential besitzen. In diesen Rollen entstehen Extraströme, welche selbst ebenfalls Phasenveränderungen des Stromes hervorbringen, aber im umgekehrten Sinne. Wir haben (S. 259) gesehen, daß bei einem Wechselstrom eine eingeschaltete Selbstinduktion den Strom verspätet, eine eingeschaltete Kapazität ihn zum Voreilen bringt gegenüber der wirkenden Spannung. Man kann daher Selbstinduktionsspulen so wählen, daß sie in bestimmten Entfernungen angebracht, immer gerade die Kapazitätswirkung des Kabels in Bezug auf die Phasenänderung aufheben. Natürlich wird durch diese Selbstinduk-

Fig. 572.



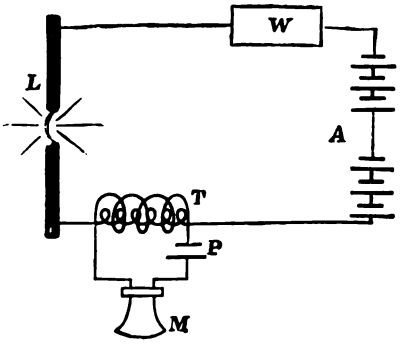
tionsspulen der Telephonstrom geschwächt, aber im ganzen wird doch durch sie eine Verbesserung des Stromdurchgangs hervorgebracht. Auf Grund dieser Tatsachen und Überlegungen wird in der letzten Zeit ein Leitungssystem, das von Pupin ausgearbeitet ist und das gerade auf der Einschaltung solcher Selbstinduktionsspulen beruht, von Siemens & Halske eingeführt, und es ist mit großem Erfolge der praktischen Erprobung unterworfen worden. Die Anbringung solcher Spulen, sogenannter Pupinspulen, auf dem Leitungsgestänge zeigt Fig. 572. Dieselben sind in Porzellangefäße eingeschlossen und werden neben den Leitungsisolatoren auf den Stangen angebracht, und sie werden direkt in die Leitung eingeschaltet. Durch dieses System wird die Länge der Leitung, auf welche man sicher telephonieren kann, bedeutend vergrößert, so daß man jetzt auf viel größere Entfernungen als früher sehr verständlich sprechen kann.

Die letzten Jahre haben einige interessante Entdeckungen gebracht, welche dem Telephon noch einen weiteren Anwendungskreis in Aussicht stellen. Wir wollen von diesen nur die singende oder sprechende Bogenlampe von Simon noch auseinandersetzen.

Wenn man in ein Mikrophon, das mit einem Element verbunden ist,

hineinspricht, so werden ja in der mit dem Mikrophon verbundenen Leitung Ströme von wechselnder Stärke erzeugt. Die sprechende Bogenlampe beruht nun auf der Übereinanderlagerung von Gleichströmen mit diesen wechselnden Strömen. Wenn man, in Fig. 573, von einer Akkumulatorenbatterie A aus durch einen Vorschaltwiderstand W hindurch den Strom zu einer Bogenlampe sendet, so erhält man in dieser den gewöhnlichen Lichtbogen. Man kann aber in diese Leitung noch einen Transformator einschalten, wie er in der Figur bei T gezeichnet ist, zwei getrennte Drahtspulen, von denen die innere dauernd von dem Akkumulatorenstrom durchflossen ist, während die äußere durch ein Element P mit einem Mikrophon M verbunden ist. Spricht man in das Mikrophon, so werden in diesem Kreis Ströme erzeugt, deren Intensität schwankt, und diese erregen in der inneren Transformatorspule Induktionsströme, welche sich also dem Gleichstrom überlagern und dessen Intensität abwechselnd verstärken und schwächen. Dadurch wird aber auch die Joulesche Wärme, die in dem Lichtbogen auftritt, abwechselnd stärker und weniger stark, der Lichtbogen wird bald mehr, bald weniger heiß, die Luft, die denselben bildet, dehnt sich bald mehr, bald weniger aus und man erhält also in der Luft periodische Verdünnungen und Verdichtungen. Da diese in demselben Tempo stattfinden, wie die Luftschwingungen, welche in das Mikrophon hineingesprochen oder -gesungen wurden, so müssen also von dem Lichtbogen aus dieselben Töne herausgesprochen oder -gesungen werden. Denn periodische Verdünnungen und Verdichtungen der Luft zeigen sich unserem Ohr als Töne an. Man erhält daher das interessante Resultat, daß die Bogenlampe die Töne wiedergibt, die man in das Mikrophon hineingesprochen hat. Um dieses Experiment recht gut auszuführen, muß erstens der Lichtbogen der Lampe sehr groß sein, statt der gewöhnlichen 2 bis 3 mm vielmehr 5 bis 10 cm, so daß man statt 40 Volt Spannung der Batterie am besten 100 Volt oder mehr zum Betreiben der Bogenlampe anwendet. Zweitens aber ist es auch notwendig, daß die Mikrophonströme selbst sehr stark seien. Man nimmt daher am besten Körnermikrophone, etwa das von Berliner. Den langen Lichtbogen erzeugt man dadurch, daß man die Kohlen mit leicht flüchtigen Salzen imprägniert.

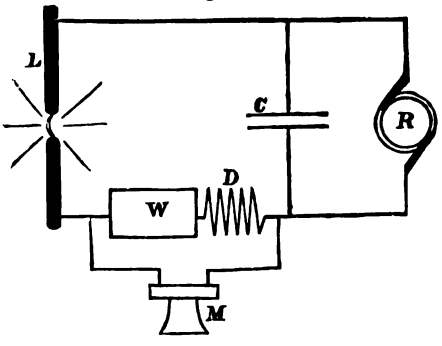
Fig. 573.



Man kann die Apparate, die zu diesen Versuchen notwendig sind, in verschiedener Weise schalten. Am vorteilhaftesten macht man Gebrauch von den entgegengesetzten Eigenschaften der Drosselspulen und Kondensatoren. Die Drosselspulen (oben S. 247) lassen Wechselströme nur sehr geschwächt durch sich hindurch, während sie Gleichströme ohne Schwächung passieren lassen, weil ja ihr Widerstand sehr klein ist. Ein Kondensator dagegen läßt einen Gleichstrom nicht hindurch, Wechselströme aber passieren ihn (S. 257). Man kann daher, wie in Fig. 574 von

einer Dynamomaschine oder Akkumulatorenbatterie R aus den Lichtbogen speisen, das Mikrophon M aber, ohne besonderes Element, von dieser Leitung abzweigen, so daß man etwa 4 Volt an den Enden des Mikrophons hat, was man durch den eingeschalteten Widerstand W erreichen kann. Man schaltet nun zum Mikrophon noch eine Drosselspule D und parallel zur Lampe eine Leydener Flasche C ein. Dadurch haben sowohl der Gleichstrom wie die Wechselströme ihre bestimmten Wege. Der Gleichstrom geht von der Maschine aus direkt durch die Lampe und durch den Widerstand und die Drosselspule zur Maschine zurück. Die Wechselströme aber, die im Mikrophon erzeugt werden, können sich wegen der Drosselspule nicht durch den Mikrophonkreis selbst ausgleichen, sondern sie müssen durch die Lampe und die Leydener Flasche gehen. Durch die Dynamomaschine gehen sie auch nicht, weil diese hohe Selbstinduktion besitzt. Daher haben sie nur denjenigen Weg, auf welchem sie allein wirken sollen, nämlich durch den Lichtbogen, und werden nicht durch Selbstinduktion geschwächt.

Fig. 574.



Auf diese Weise kann man eine Bogenlampe so laut sprechen lassen, daß sie in einem großen Raum überall gehört wird, und zwar gibt sie das Sprechen, Pfeifen, Singen und die Töne verschiedener Musikinstrumente sehr gut wieder. Die Töne sind zwar sehr rein, weil es die Luft selber ist, die sie erzeugt, weil sie nicht erst durch metallische Membranen oder dergl. erzeugt werden, aber sie werden häufig durch das unbeabsichtigte Zischen des Lichtbogens gestört und verdeckt.

Möglicherweise kann die sprechende und singende Bogenlampe noch manche Anwendung in der Zukunft finden, da sie eben die Töne recht laut wiedergibt. Bisher allerdings hat sie nur die Bedeutung eines interessanten wissenschaftlichen Experiments.

15. Kapitel.

Die drahtlose Telegraphie.

Durch nichts wird der rapide Fortschritt, den unsere Kenntnis der Elektrizität und unsere Macht über sie in den letzten Jahrzehnten erfahren haben, so deutlich gekennzeichnet, wie durch den jüngsten Zweig der Elektrotechnik, die drahtlose Telegraphie. Waren doch alle jetzt lebenden Menschen von Jugend auf gewohnt, die Elektrizität stets an die Leitungsdrähte gebannt zu sehen, wußte man doch nichts anderes, als daß man zur Fortleitung der Elektrizität und ihrer Wirkungen stets Metalldrähte anwenden mußte. Und nun wird auch dieses scheinbar notwendigste Hilfsmittel für jede Benutzung der Elektrizität eliminiert und dadurch am deutlichsten manifestiert, wie die wissenschaftlichen Fortschritte in der Kenntnis der Elektrizität auch ganz neue Mittel zu ihrer Benutzung an die Hand geben. Zwar wußte natürlich jeder, der sich mit den Erscheinungen der Elektrizität beschäftigt hatte, schon lange, daß man von ihr auch Wirkungen in gewisser Entfernung ohne Vermittelung von Drähten erhalten könne. Sowohl die Erscheinungen der Influenz in der Elektrostatik wie die Induktionserscheinungen der elektrischen Ströme waren Fernwirkungen ohne Vermittlung von Drähten, bloß durch die Luft hindurch. Aber diese Wirkungen waren auf sehr kurze Entfernungen beschränkt, und die Möglichkeit, auf einigermaßen große Entfernungen vermittels der Induktionserscheinungen Signale zu geben, also drahtlos zu telegraphieren, schien aussichtslos zu sein, obwohl man schon vor Jahren in England darüber Versuche angestellt hatte. Stationäre Ströme und solche mit verhältnismäßig langsamen Wechseln, wie etwa die Induktionsströme unserer Induktionsapparate, sind im wesentlichen auf die Leiter beschränkt und bleiben in diesen. Die elektrischen Bewegungen, die sie in dem umgebenden Äther erzeugen, sind so schwach, daß nur in ihrer nächsten Nähe Induktionswirkungen erzeugt werden.

Durchaus andere Verhältnisse aber treten auf, wenn man es mit sehr rasch wechselnden elektrischen Bewegungen zu tun hat. Je rascher die elektrischen Bewegungen sind, die man etwa in Drähten erzeugt, desto mehr und kräftiger erregen sie auch den umgebenden Äther und erzeugen in diesem ebenfalls periodische Bewegungen, die sich durch das Äthermeer ohne metallische Leitung fortpflanzen. Daher beruht die drahtlose Telegraphie ganz auf den Entdeckungen von Heinrich Hertz, welcher zuerst gelehrt hatte, rasche elektrische Schwingungen zu erzeugen. Es ist das große Verdienst von Marconi, einem italienischen Ingenieur, daß er mit dem Blick des technischen Erfinders die Anwendbarkeit der elektrischen Wellen für diese Zwecke einsah. Allerdings konnte man zuerst, als Marconi im Jahre 1896 mit einem System der drahtlosen Telegraphie in die Öffentlichkeit trat und bei einigen Ver-

suchen in England und Italien auf Entfernungen von zirka 3 bis 4 Kilometer wirklich eine telegraphische Übermittelung durch die Luft, ohne Drähte, zu stande brachte, nicht sehr große Hoffnungen und Erwartungen auf diese Übermittelung setzen. An eine Ausdehnung dieser Telegraphie auf Hunderte von Kilometern konnte man, auch wenn man genügend Sachkenntnis besaß, nicht wohl glauben. Und nun sind noch nicht 8 Jahre abgelaufen, und schon setzt Marconi seiner Tätigkeit kein geringeres Ziel, als den Atlantischen Ozean zwischen Europa und Amerika telegraphisch ohne Drahtverbindung zu überbrücken, und es ist vorauszusehen, daß er oder ein anderer dieses Ziel erreichen wird, wenn auch vielleicht die erste Nachricht, daß bereits eine telegraphische Depesche auf diesem Wege die Bahn von Amerika nach England gefunden habe, daß das Ziel schon erreicht sei, irrtümlich war.

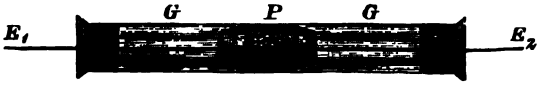
Diese staunenswerte Entwickelung einer ganz neuen Technik ist, wie bei jeder Technik, nur dem sorgfältigsten Studium aller einschlägigen Fragen zuzuschreiben. Hier, wie überall, ist zwar die erste Idee das Geniale, aber diese Genialität führt nicht zum Erfolge ohne andauernde fleißige und sorgsame Arbeit an allen Einzelheiten. Nicht alle Verbesserungen und Vervollkommnungen der drahtlosen Telegraphie rühren von Marconi her, obwohl er tatsächlich mit großer Energie sofort jeden neuen Weg eingeschlagen hat, der ihn weiterführen konnte. Viele und sogar die wichtigsten Fortschritte rühren von Deutschen, Prof. Braun in Straßburg und Prof. Slaby in Charlottenburg, her, deren Systeme von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin, System Telefunken, ausgeführt werden, und die vielfache Anlagen nach diesen Systemen schon errichtet hat.

Wenn zwischen gegenüberstehenden geladenen Leitern ein elektrischer Funke überspringt, so gleichen sich durch diesen Funken die Ladungen nicht ohne weiteres aus, wie man zunächst annehmen könnte, sondern es findet in diesem Funken und in den beiden geladenen Leitern eine hin und her gehende Bewegung der Elektrizität, eine oszillatorische Entladung statt. Daß die Ursache dieser Oszillationen auf den Extraströmen beruht, und daß daher die Periode dieser Oszillationen außer von der Kapazität der Leiter, also der Menge der auf ihnen vorhandenen Elektrizität, noch von dem Selbstpotential der Leiter mit ihren Verbindungsdrähten abhängt, haben wir bereits auf S. 265 gesehen und werden wir nachher noch weiter besprechen. Diese elektrischen hin und her gehenden Bewegungen sind aber nicht durchaus auf das System der beiden Leiter und den Funken beschränkt. Da der Funke in der Luft überspringt und daher ein Vorgang in dem in der Luft enthaltenen Äther ist, so finden zunächst in dem Äther an den Stellen, an denen der Funke vorhanden ist, solche hin und her gehende Bewegungen statt, und da der benachbarte Äther, außerhalb des Funkens, mit dem durch den Funken bewegten zusammenhängt, so entstehen auch in diesem periodische Bewegungen, die sich also nun von dem Funken aus kugelförmig nach allen Richtungen, soweit kein Hindernis vorliegt, ausbreiten. Das war die große Entdeckung von Hertz, und diese Entdeckung wurde noch präzisiert durch die Feststellung, daß die Geschwindigkeit, mit der diese periodischen Bewegungen durch den Äther sich fortpflanzen, eine ganz enorme ist, nämlich

gleich der Geschwindigkeit ist, mit der das Licht sich fortpflanzt, daß sie also in jeder Sekunde einen Weg von 300 000 Kilometern zurücklegen.

Wenn nun von einem Funken aus sich die elektrischen Bewegungen wellenartig durch den Äther fortpflanzen, also nach kurzer Zeit an entfernten Stellen ebensolche periodische Bewegungen vorhanden sind, wie in dem Funken selbst, so kommt es nur darauf an, an diesen Stellen das Vorhandensein der periodischen Bewegungen auch wirklich nachzuweisen. Das einfachste und äußerst empfindliche Mittel dafür ist der Kohärer (oder Fritter), der von Branly entdeckt wurde und der in Fig. 575 in einer einfachen Form abgebildet ist. Wir haben denselben bereits auf S. 269 beschrieben und dort auch ausgeführt, daß der Kohärer immer mit einem galvanischen Element verbunden ist und daß man auch einfach vermittels derselben Batterie das Abklopfen des Kohärers bewirken kann, damit er nach jedem Stromdurchgang von neuem auf ankommende elektrische Wellen reagieren kann. Durch den Kohärer nun zeigen sich elektrische Wellen auch in großen Entfernungen von der Erzeugungsstelle an. Und dazu kommt, daß der Kohärer noch die bequeme Form hat, daß er direkt wie ein Relais wirkt. Denn da er in den Stromkreis einer Batterie, einer Lokalbatterie, eingeschaltet ist, so kann diese für sich sehr kräftige Wirkungen ausüben, auch wenn die ankommenden Wellen, durch welche der Kohärer angeregt wird, sehr schwach sind. Verbindet man, wie es oben S. 270 beschrieben wurde, die Lokalbatterie des Kohärers noch mit einer elektrischen Klingel, so kann man direkt jede ankommende Welle durch Ertönen der Glocke hören. Man kann aber ebenso auch statt der Klingel oder parallel zu ihr einen Morseschen Schreibtelegraphen einschalten. Dann wird durch jede ankommende Welle der Kohärer leitend, wodurch der Kreis der Lokalbatterie geschlossen wird, und der so entstehende Strom erregt den Elektromagneten des Morseapparats, und der Stift des Apparats schreibt auf dem Papierband die Zeichen. Schickt man also nur eine kurz dauernde Welle aus, indem man in der Aufgabestation bloß einen Funken erzeugt, so schreibt der Morseapparat einen Punkt. Schließt man aber in der Aufgabestation den Induktionsapparat längere Zeit, so entstehen eine Reihe von aufeinanderfolgenden Funken, deren Wellen auf den Kohärer fallen, und dessen Klingel eine Zeitlang in Bewegung setzen, so daß auch durch den Morseapparat eine Reihe von nahe nebeneinander liegenden Punkten aufgeschrieben werden. Geht das Papierband des Morseapparats genügend rasch, so schließen sich die Punktreihen zu einer Linie zusammen. So erhält man also an der entfernten Station Punkte oder Linien und kann daher mit dem gewöhnlichen Morsealphabet ohne Draht telegraphieren.

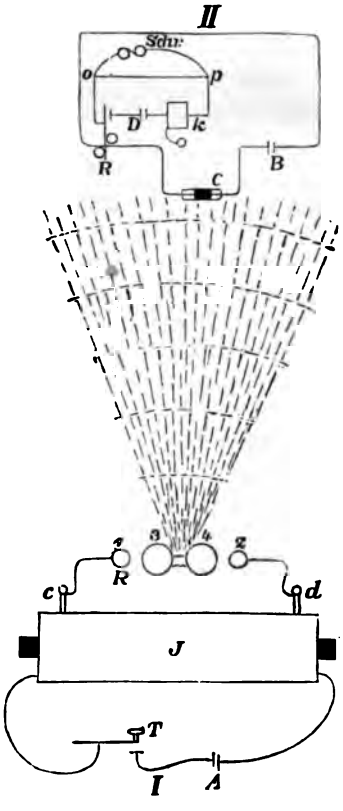
Fig. 575.



Die Anordnung für diese Versuche ist schematisch durch Fig. 576 gekennzeichnet. In der Station I sieht man eine Batterie A, die durch einen Morsetaster T mit den primären Klemmen eines Induktionsapparates J verbunden ist. Die sekundären Pole c und d desselben sind zu einem Righischen Oszillator R geführt, der, wie wir wissen (S. 272),

aus 4 Kugeln 1, 2, 3, 4 besteht. Die inneren Kugeln 3 und 4 befinden sich in Petroleum. Bei jedem Druck des Tasters entstehen Funken zwischen den Kugeln 1 und 3, sowie zwischen 4 und 2 und auch zwischen 3 und 4, und diese letzteren sind die wirksamen. Durch diese Funken wird der umgebende Äther in Schwingungen versetzt, und diese Schwingungen pflanzen sich, wie es durch die punktierten Linien angedeutet ist, wellenförmig in kugelförmiger Ausbreitung immer weiter fort. An der Station II ist nun ein Kohärer C vorhanden, der mit einem Element B und einem empfindlichen Relais R in einem Stromkreis liegt. Sobald der Kohärer leitend wird, geht der Strom von B durch das Relais, bewegt dessen Anker und das Relais schließt dadurch einen Lokalstromkreis, in welchem eine Batterie D, die Klingel K und der parallel dazu geschaltete Morseapparat *Schr* vorhanden ist. Der Morseapparat wird dadurch in Tätigkeit versetzt. Zugleich stößt die Klingel den Kohärer an, um ihn nach jeder Welle wieder gebrauchsfähig zu machen. Der Morseapparat gibt also bei jedem einmaligen Niederdrücken des Tasters in I einen Punkt, bei längerem Niederdrücken des Tasters eine Reihe von Punkten, die, wenn das Papier des Morseapparates mit passender Geschwindigkeit sich bewegt, zu einem Strich zusammenfließen.

Fig. 576.



Dies ist das Prinzip der drahtlosen Telegraphie oder, wie man sie auch nennt, der Funkentelegraphie. Indes ist die beschriebene Einrichtung nur ein Laboratoriumsversuch, die Entfernung, auf welche man so direkt mittels dieser Apparate Zeichen geben kann, ist eine ziemlich unbedeutende, sie dürfte unter günstigen Umständen kaum 100 m übersteigen. Zu einer telegraphischen Übermittelung für einigermaßen große Entfernungen eignet sich diese Einrichtung nicht, weil die Wirksamkeit der elektrischen Wellen, die sich nahezu kugelförmig ausbreiten, mit wachsender Entfernung rasch so gering wird, daß sie den Kohärer nicht mehr anregen. Hier nun hat Marconi das unbestreitbare Verdienst, zuerst solche Veränderungen und Verbesserungen durchgeführt zu haben, daß aus dem Laboratoriumsexperiment mit wunderbarer Schnelligkeit ein technisch vorzügliches System der praktischen Telegraphie ohne Draht wurde.

Die erste und wesentlichste Einrichtung, die Marconi dabei traf, bestand in folgendem: Marconi führte in der Station I von der einen Kugel 1 des Righischen Oszillators einen langen Draht geradlinig in die

Höhe und verband die gegenüberliegende Kugel 2 des Oszillators mit der Erde, wie es Fig. 577 zeigt. An die Kugel 1 ist ein langer Draht a A (anfangs von 6 m Länge) in die Höhe geführt, den man A n t e n n e nennt, während die Kugel 2 zur Erde abgeleitet ist. Es hat sich später gezeigt, daß man, wie in Fig. 578, die Antenne auch an einer der mittleren Kugeln 3 anbringen und die Kugel 4 zur Erde ableiten kann. Aber nicht bloß an der Sendestation I, sondern auch an der Empfangsstation II wurde eine solche Antenne angebracht, indem das eine Ende des Kohärers mit der Antenne, das andere mit der Erde verbunden wurde. Ebenso wurde auch der andere Pol des Elementes in Station II zur Erde abgeleitet. Durch Hinzufügung

Fig. 577.

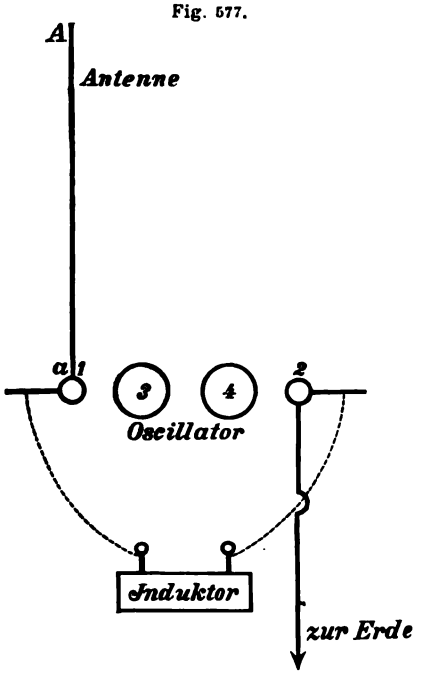
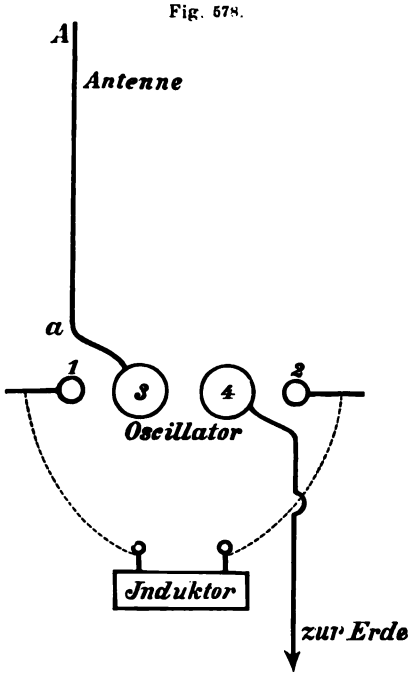


Fig. 578.



dieser Antennen wuchs sofort die Entfernung, auf welche man telegraphieren konnte, ganz außerordentlich. Mit Antennen von 6 m gelang es Marconi, auf 1600 m zu telegraphieren, mit Antennen von 25 m Höhe konnte er auf 14 km und mit solchen von 30 m auf 18 km telegraphieren. Überhaupt ergab sich bei diesen ersten Versuchen, daß die Entfernung, auf welche man in dieser Weise drahtlos telegraphieren kann, mit dem Quadrat der Höhe der Antennen wächst. Bei Versuchen zwischen der Küste und einem Schiff war die erreichbare Entfernung zirka das 300fache der Länge dieser Drähte. Bei Landversuchen ergab sich die erreichbare Entfernung nur etwa 70mal so groß wie die Länge der Drähte.

Die Gründe, warum diese Drähte so vorteilhaft wirken, sind nicht ohne weiteres klar, aber ihre Wirksamkeit ist durch zahlreiche Versuche erprobt. Man bezeichnet auch oft die Antenne in der Station I als den S e n d e d r a h t , die in der Station II als den E m p f ä n g e r d r a h t.

Wenn die Wellen sich von einer Funkenstrecke aus direkt in den Äther ausbreiten, so erfüllen sie immer größere und größere Kugelflächen, ihre Stärke muß also abnehmen im Verhältnis des Quadrats der wachsenden Entfernungen. Werden dagegen die Wellen von einem solchen Sendedraht ausgeschickt, so breiten sie sich zum Teil seitlich derartig aus, daß sie immer größere und größere Zylinder erfüllen, die den Sendedraht als Achse haben. Ihre Stärke muß dann zwar auch abnehmen, aber nur wie die wachsenden Entfernungen selbst, nicht wie die Quadrate derselben. Das dürfte einer der Gründe für die Wirksamkeit der Drähte sein.

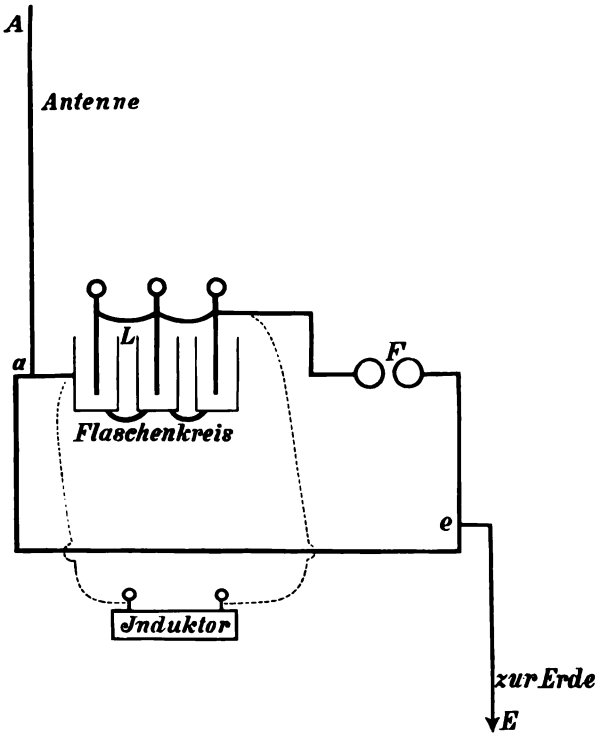
Der Draht an der Sendestation ist also derjenige Teil der ganzen Anordnung, welcher die elektrischen Wellen ausstrahlt. Über die Vorgänge in der Antenne selbst war man lange Zeit im Irrtum. Der Righische Oszillator erzeugt, wie wir auf S. 272 gesehen haben, sehr kurze elektrische Wellen, solche von 20 bis 30 cm Länge. Die Periode solcher elektrischen Wellen wird ja um so kleiner, also auch die von ihnen erzeugte Wellenlänge in der Luft um so kürzer, je kleiner die Kapazität und die Selbstinduktion des erzeugenden Systemes ist. Bei den Righischen Kugeln sind nun die Kapazität und die Selbstinduktion so geringe, daß eben die Wellen nur die angegebene geringe Länge besitzen. Man nahm nun zuerst an, daß durch die Anbringung einer solchen Antenne darin nichts geändert wird, daß der Apparat dann immer noch Wellen von 20—30 cm Länge gibt. Das war aber ein Irrtum. Vielmehr beeinflußt die Antenne die Periode des Oszillators ganz wesentlich. Bei solchen offenen Schwingungssystemen, wie es die Antenne ist, kommt es wesentlich auf die Länge des Systems an. Die Wellenlänge, die ein solcher mit Antenne versehener Oszillator erzeugt, muß eine bedeutend größere sein, als wenn die Antenne nicht vorhanden ist. Der wirkliche Vorgang in dem Oszillator mit Antenne ist ganz ähnlich demjenigen, der bei der Schallerzeugung in einer gedeckten Pfeife oder in einem angeschlagenen Stab stattfindet. In einer solchen Pfeife bilden sich nämlich stehende Schallwellen aus. Die Schallbewegung, die an der Öffnung der Pfeife erregt wird, pflanzt sich bis zum Ende der Pfeife fort, wird dort reflektiert und bildet dadurch stehende Wellen. In solchen stehenden Wellen findet man stets Knoten und Bäuche. An der Öffnung der Pfeife ist die Luftbewegung am stärksten, dort ist ein Bauch für sie, an dem gedeckten Ende ist keine Luftbewegung vorhanden, dort ist ein Knoten. Der Abstand zwischen einem Bauch und einem Knoten ist aber immer der vierte Teil der Wellenlänge, die die Pfeife erzeugt; also auch umgekehrt, eine gedeckte Pfeife von einer bestimmten Länge erzeugt immer einen solchen Ton, daß seine Wellenlänge in der Luft 4mal so groß ist wie die Länge der Pfeife selbst. Während an dem gedeckten Ende der Pfeife die Luftbewegung selbst verschwindet und sie an der Öffnung ein Maximum ist, ist der Druck der Luft umgekehrt am gedeckten Ende am größten und in der Öffnung Null. Das gedeckte Ende bildet einen Knoten für die Bewegung, aber einen Bauch für den Druck.

Unseren elektrischen Oszillator mit seiner Antenne können wir vollständig mit einer solchen Pfeife vergleichen. Die Stelle, wo der Funke überspringt, also an den Kugeln, entspricht der Öffnung, das Ende der Antenne dem gedeckten Ende der Pfeife. Die durch den Funken er-

zeugte elektrische Bewegung pflanzt sich zunächst längs der Antenne fort bis zu ihrem Ende, wird dort reflektiert und bildet so stehende elektrische Wellen aus. Und daher muß ebenso wie oben die Länge der Antenne gleich dem vierten Teil der erzeugten Wellenlänge sein. In den Kugeln ist die elektrische Bewegung, die Stromstärke, am größten, dort ist ein Bauch für die Stromstärke, am Ende der Antenne ist die elektrische Bewegung Null, dort ist ein Knoten für dieselbe. Die elektrische Spannung dagegen hat, ganz wie der Druck bei den Luftschwingungen, einen Knoten an den Kugeln und einen Bauch am Ende der Antenne.

Die richtige Vorstellung von der Wirkung der Antenne ist also folgende: Die Wellen, die im Oszillator erzeugt werden, haben eine solche Wellenlänge, daß die Länge der Antenne der vierte Teil derselben ist. Die Länge der Antenne bedingt also wesentlich die Länge der elektrischen Wellen, mit denen man operiert. Marconi hatte es nicht mit Wellen von 20 bis 30 cm, sondern mit solchen von 25 bis 120 m Länge bei seinen ersten Versuchen zu tun, bei den späteren mit noch größeren. Der geradlinige Draht, die Antenne, gestattet nun die Ausstrahlung dieser Wellen in den Äther, welcher daher von Wellen derselben Länge durchzogen wird.

Fig. 579.



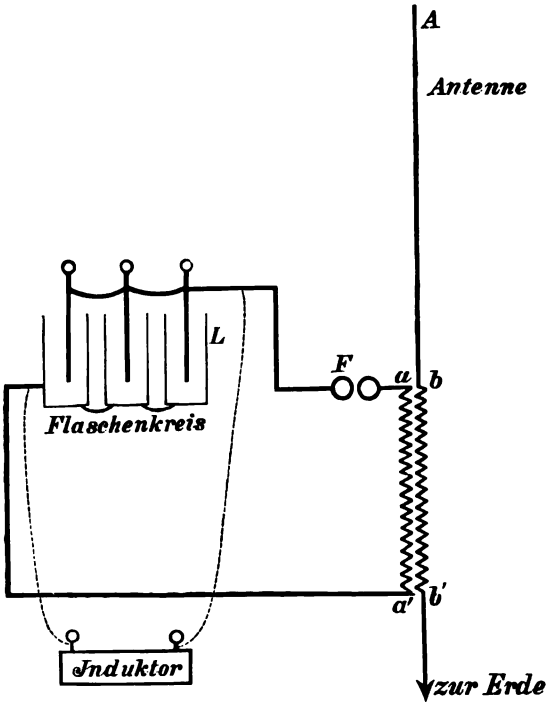
Der wesentlichste Fortschritt, der in der Entwickelung der Funkentelegraphie über Marconi hinaus gemacht wurde, rührt nun von Prof. Braun in Straßburg her. Dieser Fortschritt beruht auf folgendem. Wenn man auf große Entfernungen telegraphieren will, so muß man durch den Sendedraht möglichst viel Energie in Form elektrischer Wellen hinaussenden. Da nun diese Wellen infolge der Antenne doch so große Länge haben, so kann man offenbar die Wellen viel zweckmäßiger und von viel größerer Energie erzeugen, wenn man dieselben in einem besonderen Kreise mit Leydener Flaschen von erheblicher Kapazität entstehen läßt und sie der Antenne nur zuführt. Denn je

größer die Kapazität des Systemes ist, welches Schwingungen erzeugt, desto größer ist die bewegte Elektrizitätsmenge und desto größer auch die Energie, welche es enthält und abgeben kann.

Deswegen erzeugte Braun die elektrischen Schwingungen in einem sogenannten Flaschenkreis, d. h. in einem System von Leydener Flaschen, die durch eine Leitung mit einer Funkenstrecke geschlossen sind und in denen durch einen Induktionsapparat Funken erzeugt werden. Das Schema dieser Braunschen Anordnung ist in Fig. 579 gezeichnet. Man sieht das Flaschensystem, das mit dem Induktor verbunden ist und dessen Ladungen sich durch die Funkenstrecke F in Funken ausgleichen, die Oszillationen erzeugen. Die Antenne, der Sendedraht A, ist direkt mit einem Punkte a des Flaschenkreises verbunden, während an einem anderen Punkt e eine Verbindung mit der Erde hergestellt ist. Man kann diese Anordnung so auffassen, daß in dem Flaschenkreis fortwährend sehr intensive elektrische Schwingungen erzeugt werden, die nun immer dem Sendedraht nachgeliefert werden, während er sie in den Raum ausstrahlt.

Es ergibt sich übrigens auf diese Weise auch die Möglichkeit, den Sendedraht gar nicht direkt an den Flaschenkreis anzuschließen (was man jetzt direkte Koppelung nennt), sondern vielmehr, wie bei dem Teslatransformator, die Schwingungen des Flaschenkreises durch Induktion auf eine Drahtrolle zu übertragen, an welche der Sender angeschlossen ist. Diese Schaltung, die von Braun vorzugsweise benutzt wird, nennt man indirekte oder induktive Koppelung. In Fig. 580 sieht man das Schema für sie. In den Flaschenkreis ist eine primäre Induktionsrolle a a′ eingeschaltet und von dieser wird eine sekundäre Rolle b b′ induziert, deren eines Ende mit der Erde, während das andere Ende mit der Antenne verbunden ist. Die Rollen b b′, a a′ bilden einen Transformator, und zwar einen Teslatransformator (da man es mit raschen Schwingungen zu tun hat), den man auch dazu benutzen kann, um die Spannung auf dem Sendedraht beliebig zu erhöhen. Die

Fig. 580.



induktive Koppelung kann, wie man es nennt, eng oder lose sein (s. S. 280). Bei loser Koppelung ist der sekundäre Kreis so weit vom primären entfernt, daß er zwar noch von diesem induziert wird, aber nicht merklich mehr zurück induziert, also die Schwingungen in dem primären Kreis nicht beeinflußt. Bei enger Koppelung dagegen, wo die beiden Kreise sehr nahe beieinander sind, werden die primären Schwingungen durch den Sekundärkreis beeinflußt. In Fig. 581 sieht man das System der Leydener Flaschen C, wie sie von der Gesellschaft Telefunken für Demonstrationsapparate konstruiert werden. Jede besteht aus einem Glasrohr von 25 mm Durchmesser und 2,5 mm Wandstärke. Vor den Flaschen sieht man ein zylindrisches Kästchen F, welches die Funkenstrecke enthält. In Fig. 582 dagegen ist der Transformator gezeichnet, der aus zwei übereinander gelegten Wickelungen besteht, der primären, die in den Flaschenkreis eingeschaltet wird, und der sekundären, deren Pole mit der Erde und mit dem Sendedraht verbunden werden. Der ganze Transformator befindet sich in einem Gefäß, das der Isolierung halber mit Öl gefüllt ist. Durch den Transformator wird erreicht, daß die Spannung der Wellen auf der Antenne eine sehr hohe wird.

Fig. 581.

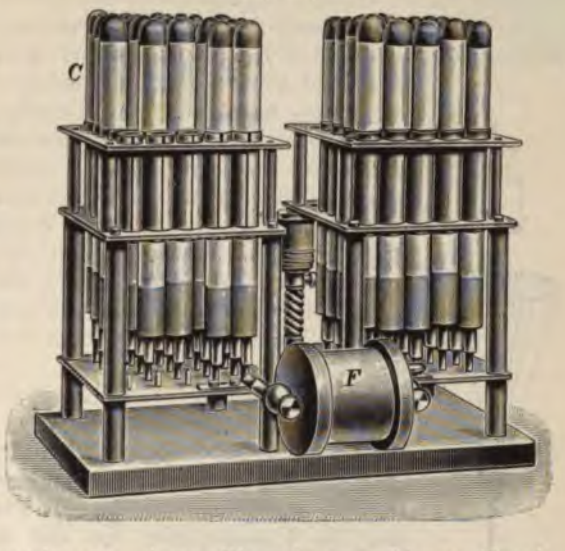
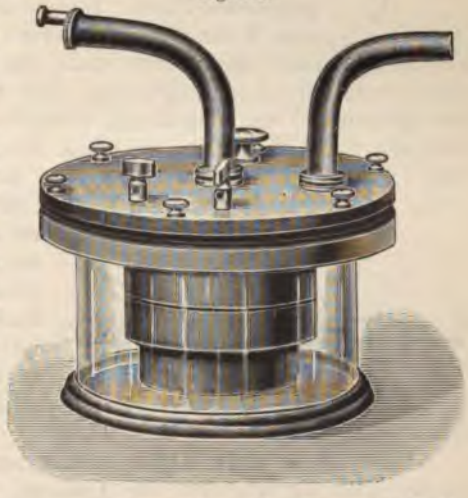


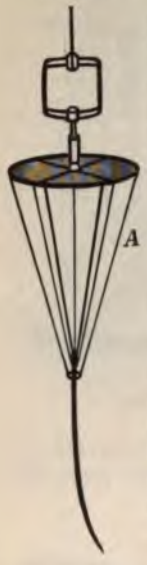
Fig. 582.



Übrigens werden die Antennen nicht immer aus einem einfachen Draht gebildet, sondern man versucht, die Kapazität der Antennen durch Vergrößerung ihrer Oberfläche zu vermehren. Deswegen werden zuweilen Antennen angewendet, die aus Drahtbündeln bestehen, wie in Fig. 583 und 584, oder es werden eine ganze Anzahl einfacher Drähte ausgespannt, die oben und unten miteinander verbunden sind.

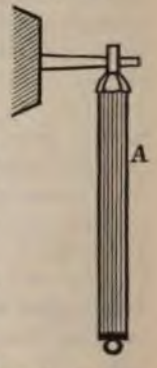
Während aber der Sendeapparat auf diese Weise durch Anwendung des Flaschenkreises befähigt wurde, möglichst große Energiemengen in Form von elektrischen Wellen auszustrahlen, kam es nun bei dem Empfangsapparat darauf an, ihn möglichst empfindlich zu machen. Denn wie groß auch die von der Sendestation ausgestrahlten Energiemengen sind, bei einigermaßen entfernten Empfangsstationen kommt doch nur ein geringer Bruchteil derselben an den dortigen Kohärer an.

Fig. 583.



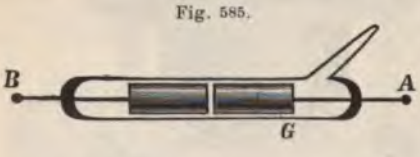
Daher war es die erste Aufgabe, den wellenanzeigenden Apparat, als welcher zunächst immer ein Kohärer gebraucht wurde, möglichst empfindlich zu machen und ihn so anzubringen, daß er von den ankommenden Wellen am besten angeregt wird. Außerdem kam es darauf an, den Kohärer so einzurichten, daß er immer exakt anspricht und exakt schweigt, sobald er von Wellen angeregt wird oder von ihnen verlassen wird.

Fig. 584.



Um zunächst die Empfindlichkeit des Kohärers zu vergrößern, hat man ihn mit besonderer Sorgfalt konstruiert, und es sind eine große Anzahl von verschiedenen Konstruktionen für ihn angegeben worden. Es kam auch wesentlich darauf an, die Unsicherheit, die der Kohärer gewöhnlich bot, indem er bald gar nicht ansprach, bald nicht mehr zu beruhigen war, wenn er einmal angeregt war, zu beseitigen. Marconi benutzte lange den Kohärer in der in Fig. 585 gegebenen Form. In eine Glasröhre G von etwa 5 cm Länge und 3 bis 4 mm innerem Durchmesser sind zwei Silberzylinder gesteckt, die nahezu dicht die Röhre ausfüllen. Der Zwischenraum zwischen den Endflächen (die manchmal abgeschrägt wurden), beträgt nur 0,5 mm und ist mit Feilspänen gefüllt. Nach Marconi erhält man die beste Wirkung durch eine Mengung von 96 Proz. Nickelspänen und 4 Proz. Silberspänen. Die Größe der Körner, die von Marconi sorgfältig sortiert werden, soll möglichst einheitlich und eine mittlere, nicht zu klein, nicht zu groß sein. Die sorgfältige Auswahl der Körner bestimmt wesentlich die Güte des Kohärers. Für seine Haltbarkeit ist es wichtig, daß er nur Ströme von $^1/_2$ bis höchstens 1 Milliampere erhält. Die Luft wird in der Glasröhre stark verdünnt, auf etwa 1 mm Druck, und die Röhre dann zugeschmolzen.

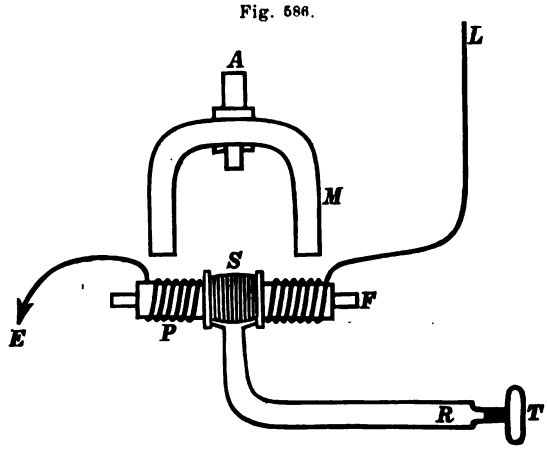
Fig. 585.



Indes auch trotz der sorgfältigsten Konstruktion ist der Kohärer immer noch ein sehr diffiziler Apparat. Lange Zeit aber war die Widerstandsverminderung solcher Feilspäne das einzige empfindliche Reagenzmittel auf elektrische Wellen, das man kannte. Jedoch haben sich im Laufe der Zeit noch zwei andere solcher Reagenzmittel ergeben, die man als Wellenindikatoren oder Wellendetektoren bezeichnet.

Elektrische Wellen haben nämlich, wie zufällig entdeckt wurde, eine ganz eigentümliche Wirkung auf den Magnetismus von Stahlnadeln, und zwar nicht auf die dauernde, sondern auf die sich verändernde Magnetisierung. Wenn man den Magnetismus einer Stahlnadel allmählich vergrößert oder verkleinert, indem man z. B. einen induzierenden Magneten ihr nähert oder entfernt, so nimmt wegen der Hysteresis (S. 167) die Stahlnadel nicht sofort den ihr zukommenden Magnetismus an, sondern sie bleibt hinter demselben zurück. Wir haben in anderen Kapiteln dieses Buches diese Eigenschaft des Eisens und Stahls schon mehrfach gefunden. Wenn nun auf eine solche Stahlnadel, deren Magnetismus zurückgeblieben ist, elektrische Wellen fallen, so nimmt dieselbe sofort den wirklichen, ihr zukommenden Magnetismus an. Das ist eine Wirkung der Wellen und eine Eigenschaft des Stahls, die man nicht voraussehen konnte, sondern die durch den Versuch sich ergeben hat. Es ist so, als ob die Wellen die Moleküle des Eisens erschüttern und dadurch die Koerzitivkraft, welche die Ursache der Hysteresis ist, aufheben. Dieses Phänomen hat nun Marconi zur Konstruktion eines magnetischen Detektors zuerst in einer Weise verwendet, welche aus Fig. 586 hervorgeht. Ein Bündel von Stahldrähten F wird durch einen Hufeisenmagneten M induziert. Indem man dieses Hufeisen sich um die Achse A drehen läßt, wird der Magnetismus der Stahldrähte periodisch verändert und zeigt dabei die Hysteresis. Um das Stahldrahtbündel ist nun eine Drahtrolle P gewickelt, welche mit der Antenne L einerseits und mit der Erde E andererseits verbunden ist. Sobald nun elektrische Wellen an die Empfangsstation und auf deren Antenne kommen, werden sie um die Stahldrähte geleitet, und dadurch wird der Magnetismus derselben plötzlich verstärkt. In einer zweiten Rolle S, einer Induktionsrolle, aus vielen Windungen bestehend, entsteht infolgedessen ein Induktionsstoß, und ein Telephon T, das an diese Rolle angeschaltet ist, gibt daher ein Knacken. So kann man jedes Morsezeichen, das aus der Sendestation an die Empfangsstation geschickt wurde, im Telephon hören.

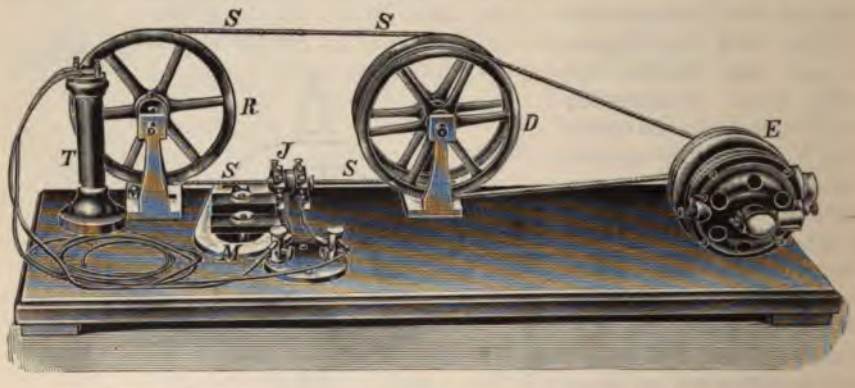
Fig. 586.



Dasselbe Prinzip ist von Marconi noch in einer anderen Weise zur Konstruktion eines magnetischen Detektors angewendet worden, der in Fig. 587 abgebildet ist. Statt den Magneten vor den Stahldrähten zu bewegen, bewegt er dabei vielmehr einen Stahldraht vor einem Magneten. Ein Stahldraht ohne Ende läuft über zwei Rädern, dem Rad R und dem hinteren von D. Das vordere Rad D wird durch einen Elektromotor E

mittels Schnurübertragung angetrieben, so daß der Stahldraht dabei dauernd sich bewegt und auf seinem Wege an den Polen des Magneten S vorbeipassiert. Dort wird er magnetisch, aber infolge der Hysteresis nicht vollständig. Er läuft dann durch die Höhlung eines kleinen Induktionsapparates J, dessen primäre Rolle einerseits mit der Antenne, andererseits mit der Erde verbunden ist, während die sekundäre mit dem Telephon T in Verbindung steht. Wieder wird durch jede an die Antenne ankommende Welle die Hysteresis aufgehoben und das Telephon gibt ein knackendes Geräusch. Dieser magnetische Detektor ist von Marconi bei seinen Anlagen, die auf große Entfernung wirken sollen, dem Kohärer

Fig. 587.



vorgezogen worden. Er soll sehr exakt wirken, und der Übelstand, den er besitzt, daß man die Zeichen mit ihm nur hören, nicht lesen kann, ist nicht von großer Bedeutung.

Ein dritter Wellenindikator, außer diesem magnetischen und dem Kohärer, ist 1903 von Schlömilch erfunden worden und beruht wieder auf einer ganz anderen, auch noch nicht vollständig erklärten Wirkung der Wellen. Wenn man eine gewöhnliche Polarisationszelle (S. 149) hat, die aus verdünnter Säure als Flüssigkeit und zwei Elektroden aus Platin oder Gold besteht, so hat diese ja ein gewisses Maximum der Polarisation. Wenn man nun als polarisierende Batterie eine solche nimmt, deren elektromotorische Kraft nur um weniges höher ist als dieses Maximum, so findet eine ganz schwache elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeit statt, an der einen Elektrode entwickelt sich Sauerstoff, an der anderen Wasserstoff und es geht also ein schwacher Strom durch die Zelle. Macht man nun die eine Elektrode, und zwar diejenige, an der sich Sauerstoff entwickelt, sehr klein, so zeigt sich, daß diese Gasentwickelung und dieser Strom deutlich beeinflußt werden durch elektrische Wellen, die auf die Zelle fallen. Sobald eine Welle auftrifft, wird der hindurchgehende Strom stärker, und es findet eine lebhaftere Gasentwickelung an der kleinen Sauerstoffelektrode statt. Die andere Elektrode kann beliebige Größe haben. Auch für dieses Phänomen ist die Ursache nicht genau bekannt, es scheint, daß auch hier wie bei dem Kohärer ein Übergangswiderstand durch die Wellen beseitigt wird. Aber unabhängig von der Erklärung

sieht man, daß man dadurch in einer solchen Zelle wieder einen Wellenindikator besitzt. Man bezeichnet ihn als elektrolytischen Detektor. Fig. 588 stellt einen solchen Detektor dar. In einem Glasgefäß befindet sich verdünnte Schwefelsäure. In dasselbe taucht ein dickerer Platindraht N, der Kathode wird, und ein sehr dünner (Wollastondraht) in einer Glasröhre befindlicher Platindraht P, der Anode wird. Von P ist nur ein ganz winziges Stück außerhalb der Glasröhre. Der Draht hat nur $^1/_{1000}$ mm Durchmesser und ragt nur um $^1/_{100}$ mm aus dem Glasrohr hinaus. Die Art und Weise, wie eine solche Zelle an Stelle des Kohärers als Empfangsapparat an die Empfangsantenne angeschlossen wird, zeigt Fig. 589. Die elektrolytische Zelle ist durch z dargestellt. Eine Batterie B von 4 Akkumulatoren ist nicht direkt mit der Zelle z zusammengeschaltet, sondern durch einen großen Widerstand W geschlossen, von dem man mittels des Gleitkontaktes c den Strom abzweigen kann. Die Zelle z wird also von diesem abgezweigten Strom — dessen Spannung man dadurch leicht verändern und regulieren kann — gespeist. Andererseits ist die kleine positive Elektrode der Zelle mit der Antenne L verbunden, indem man von der Antenne, resp. von einigen Drahtwindungen S, die mit ihr verbunden sind, durch den Kontakt d die Wellen ihr zuführt. In dem Stromkreis der Zelle liegt nun direkt das Relais R, welches den Morseapparat betätigt. Durch jede ankommende Welle wird das Relais geschlossen und der Morseapparat schreibt. Man kann auch an Stelle des Relais ein Telephon einschalten, dann hört man die Morsezeichen. In Wirklichkeit reagiert ein Telephon, das mit einer solchen Zelle verbunden ist, besser als ein Morseapparat.

Fig. 588.

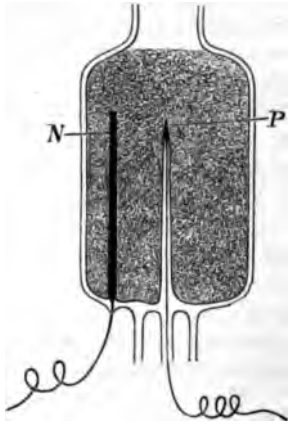
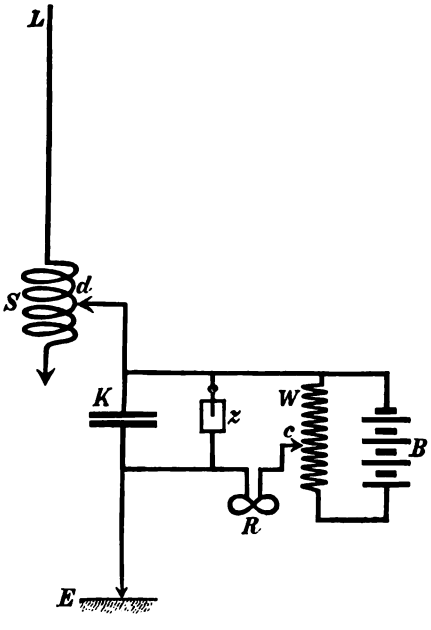


Fig. 589.



Dieser elektrolytische Detektor wirkt ausgezeichnet exakt, wenn die positive Elektrode sehr kleine Oberfläche hat und scheint von allen Übelständen der anderen Indikatoren frei zu sein. Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie benutzt ihn zum Teil bei den Anlagen ihres Systems, welches sie als Telefunkensystem bezeichnet, eine so geschmacklose Wortbildung übrigens,

daß man nur bedauern muß, daß der Gymnasialunterricht nicht mehr für alle höheren Berufe obligatorisch ist.

In diesen Detektoren hat man nun eine Reihe von Mitteln, um ankommende Wellen von sehr geringer Stärke noch an der Empfangsstation erkennen zu können.

Die Antenne der Empfangsstation wird in einigen Fällen direkt mit dem Indikator verbunden, wie es Fig. 589 z. B. zeigt, in anderen Fällen geschieht die Verbindung auch induktiv, wie bei der Sendestation. In diesem Falle wird die Empfangsantenne mit einer primären Drahtspule eines Transformators verbunden und ist durch diese mit der Erde in Verbindung. Um diese primäre Drahtspule ist eine sekundäre gelegt, und erst diese ist mit dem Kohärer und Relais verbunden. Abgesehen von anderen Vorteilen wird dadurch eine geringere störende Wirkung der atmosphärischen Elektrizität auf den Kohärer erzielt, und ferner, da die Spannung im sekundären Kreis des Kohärers größer ist, als die Spannung auf der Antenne, auch ein besseres Ansprechen des Kohärers, der auf Spannungsschwankungen besonders reagiert.

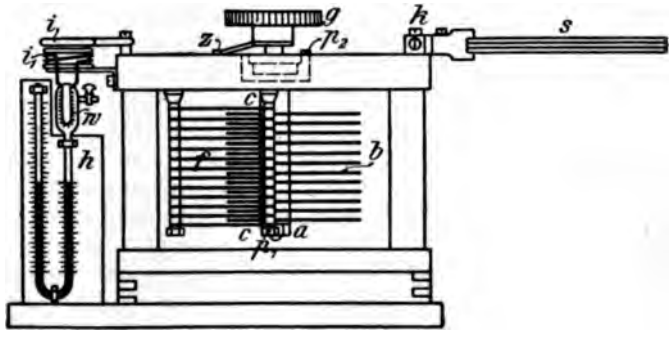
Um nun aber die verschiedenen Apparate, die zu der drahtlosen Telegraphie gehören, auf den höchsten Grad der Empfindlichkeit zu bringen, ist noch auf einen wesentlichen Umstand Rücksicht zu nehmen. Es müssen alle diese Apparate, Flaschenkreis, Sendeantenne, Empfangsantenne in Resonanz gebracht werden. Durch die Anwendung der Resonanzerscheinungen, die wir S. 278 f. besprochen haben, gelingt es, alle Wirkungen sehr viel kräftiger hervortreten zu lassen und überhaupt in vielen Fällen noch Wirkungen zu erzielen, in denen ohne die Anwendung der Resonanz die Wellen ganz unwirksam wären.

Es muß also die Periode der Eigenschwingung des Flaschenkreises mit seiner primären Transformatorspule viermal so groß sein wie die der Sendeantenne mit ihrer sekundären Spule und ebenso muß die Empfangsantenne mit den mit ihr verbundenen Apparaten dieselbe Periode besitzen wie die Sendeantenne.

Diese Abstimmung wird erreicht, indem man einerseits im primären Flaschenkreis die Kapazität und das Selbstpotential der Drähte reguliert, andererseits an die Antennen noch Drahtwindungen (Selbstpotential) anschließt, von denen man eine größere oder geringere Zahl benutzt, wie es in Fig. 589 schon bei S gezeichnet war. Dieses Einregulieren von zwei Stationen auf Resonanz ist im allgemeinen eine ziemlich schwierige Aufgabe. Erleichtert wird dieselbe durch einen Apparat, welchen man Wellenmesser nennt und welcher die elektrischen Wellenlängen, die jedes System gibt, einfach zu bestimmen gestattet. Der Apparat besteht aus einem System von Kondensatoren, deren Kapazität in weiten Grenzen einfach verändert werden kann, und aus einigen Spulen mit Selbstpotential, und er wird in der Weise benutzt, daß man seine Kapazität und seine Selbstinduktion so lange ändert, bis er mit dem zu messenden Schwingungssystem in Resonanz ist. In Fig. 590 ist das Schema dieses Apparates gezeichnet. Man sieht ein System von Plattenkondensatoren f, b, deren Kapazität einfach dadurch geändert werden kann, daß durch die Schraube g die Platten b mehr oder minder in die Zwischenräume der Platten f hineingedreht werden. Mit diesem Kondensator ist eine Draht-

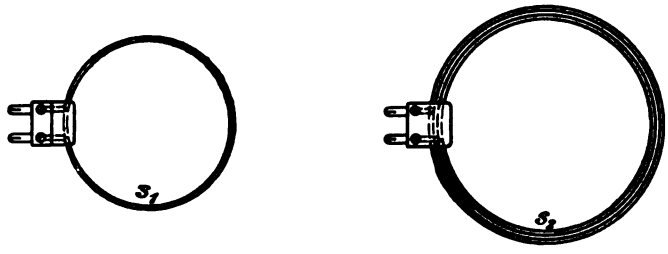
rolle s verbunden, welche Selbstpotential besitzt. Diese kann auch leicht durch eine kleinere s_1 oder eine größere s_2 ersetzt werden, welche man in Fig. 591 sieht. Wird die Rolle s einem Drahtkreis gegenübergestellt, in welchem elektrische Schwingungen stattfinden, so wird sie selbst durch Induktion (induktive Koppelung) zu Schwingungen erregt. Diese Schwingungen finden dann auch in der mit s und dem Kondensator verbundenen

Fig. 590.



kleinen primären Spule i statt. Von dieser wird wieder eine andere sekundäre Spule i_1 induziert und von dieser führt eine Drahtschleife w in das Gefäß eines Luftthermometers h, welches Wasser oder Alkohol als Sperrflüssigkeit enthält. In der Spule i_1 und der Schleife w wird durch die Schwingungen Joulesche Wärme erzeugt, die Luft in dem Gefäß dehnt sich aus und verschiebt die Sperrflüssigkeit in dem U-förmigen Rohr. Je stärker die Schwingungen in dem Wellenmesser sind, desto mehr Wärme

Fig. 591.

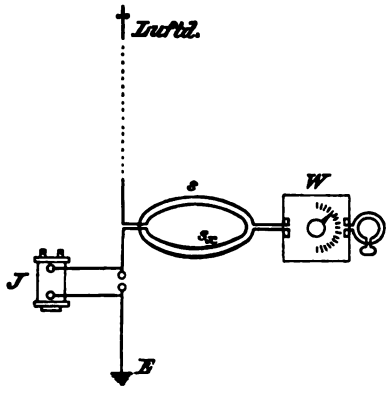


entsteht, desto größer ist die Verschiebung der Sperrflüssigkeit. Ist der Wellenmesser also mit einem schwingenden System in Resonanz, so erreicht die Verschiebung ein Maximum. Man kann nun ein für allemal durch Eichung vorher feststellen, welcher Periode, also welcher Wellenlänge jede Stellung des Kondensators bei jeder von den drei eingeschalteten Spulen entspricht. Die Dimensionen sind so abgemessen, daß mit der kleinsten Selbstinduktion und der kleinsten Kapazität die Eigenschwingung des Wellenmessers einer Wellenlänge von 140 m entspricht. Vergrößert man die Kapazität nun bis zum Maximum (bei Anwendung derselben Rolle s_1), so vergrößert sich die entsprechende Wellenlänge bis zu 280 m.

Die zweite Selbstinduktion s ist so abgemessen, daß sie bei der kleinsten Kapazität gerade auch 280 m Wellenlänge ergibt. Durch Drehung der Kondensatorplatten kann man dann die Wellenlänge wieder auf das Doppelte, bis 560 m, und endlich ebenso bei der dritten Selbstinduktion s_2 von 560 auf 1120 m bringen. So erlaubt der Apparat alle Wellenlängen von 140 bis 1120 m einzustellen. Durch Ablesen der Stellung eines Zeigers z, der mit der Schraube g verbunden ist und auf einem geteilten Kreis sich verschiebt, kann man sofort die Wellenlänge in Metern angeben.

Bei der Anwendung des Instrumentes zur Messung der unbekannten Wellenlänge, welche in einem beliebigen schwingenden System herrscht, geht man folgendermaßen vor. Es sei z. B. die Wellenlänge zu messen, die in einem Luftdraht (Antenne), wie in Fig. 592, herrscht, der durch die Funkenstrecke des Induktionsapparates J zu Schwingungen angeregt wird. Man schaltet in die Antenne eine einzige Drahtwindung s_x ein, die die Schwingung nicht wesentlich beeinflußt. Dieser Drahtwindung stellt man die Selbstinduktion s des Wellenmessers W in passendem Abstand gegenüber, nämlich in solchem, daß die Schwingungen des Luftdrahts dadurch nicht wesentlich beeinflußt werden (die sogenannte lose Koppelung), und ändert nun die Kapazität der Kondensatoren resp. auch die Selbstinduktion s so lange, bis das Luftthermometer den größten Ausschlag macht. Dann ist der Wellenmesser in Resonanz mit dem Luftdraht und die an der Skala des Wellenmessers abgelesene Wellenlänge ist zugleich die der Antenne.

Fig. 592.

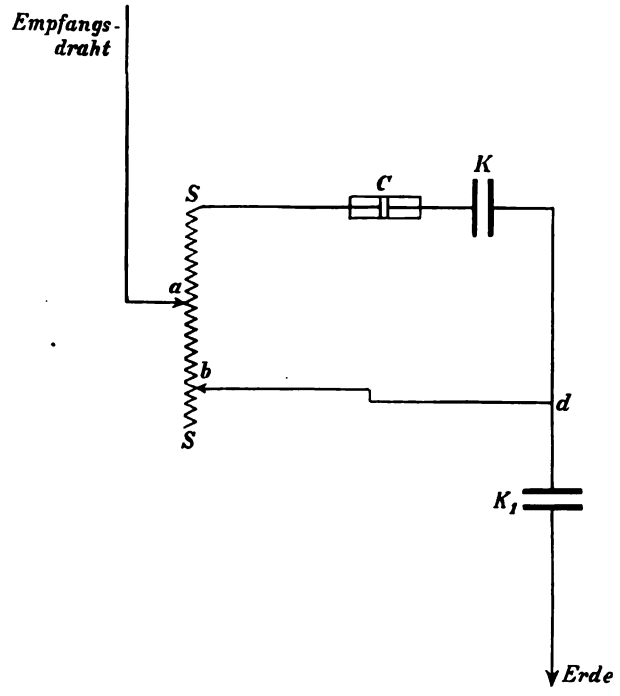


Durch diesen Apparat ist die Abstimmung aller Teile einer Einrichtung für drahtlose Telegraphie aufeinander verhältnismäßig leicht geworden und dadurch werden die Entfernungen, auf welche man noch Depeschen geben kann, wesentlich vergrößert.

Bei den in der Praxis der drahtlosen Telegraphie gebrauchten Apparaten kommt es nun darauf an, nicht nur die Wellenlängen des Senders und Empfängers bestimmen zu können, sondern sie auch ändern zu können. Das ist namentlich für den Empfänger wichtig, da dieser, wenn er z. B. auf einem Schiff sich befindet, von verschiedenen Stationen, die mit verschiedener Wellenlänge arbeiten, die Telegramme aufnehmen soll. Es könnte nach dem Obigen scheinen, daß das nicht zweckmäßig angeht, ohne daß man auch die Länge der Antenne ändert. Aber man kann die Länge eines Luftdrahtes unverändert lassen und ihn doch in seiner elektrischen Schwingungsdauer verändern, wenn man mit ihm an seinem Ende eine Anzahl Drahtwindungen und eventuell auch einen Kondensator verbindet, die man variieren kann. Dadurch erteilt man dem Luftdraht auch eine variable Selbstinduktion, indem man mehr oder weniger Drahtwindungen benutzt, und eine variable Kapazität, indem man den Kon-

densator verändert, und kann so den Luftdraht auf jede Schwingungsdauer des Sendekreises abstimmen. Die Koppelung eines Empfangskohärers kann nun entweder direkt sein, oder induktiv. In Fig. 593 ist eine direkte Koppelung mit variierbarer Schwingungsdauer für den Kohärer gezeichnet. Der Empfangsdraht ist durch einen Schiebekontakt an eine Stelle a einer Selbstinduktionsspule S S angelegt. Durch Veränderung der Stellung von a kann man mehr oder weniger solche Windungen an den Luftdraht anlegen. In der Zeichnung sind die Windungen von a bis b an den Luftdraht angeschlossen, von b geht die

Fig. 593.

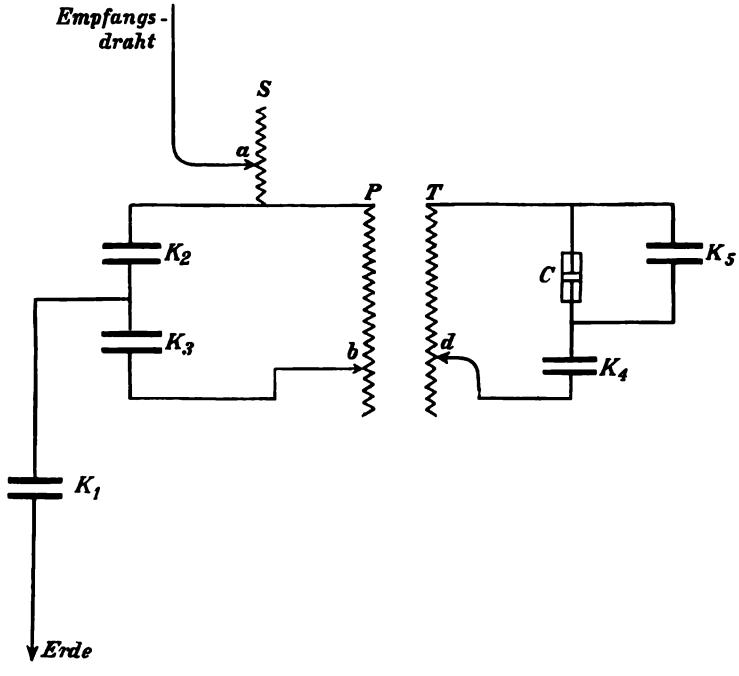


Leitung des Luftdrahtes über d zum Kondensator K_1 und zur Erde. Es ist also in den Luftdraht bei K_1 auch eine Kapazität eingeschaltet, die auch variiert werden kann. An die Induktionsspule ist nun der Kohärer C mit einem Kondensator K angelegt und durch den Schieber b kann man auch in diesen Kreis mehr oder weniger Selbstinduktion einschalten und so den Schwingungskreis des Kohärers abstimmen auf die Schwingung des Empfangsdrahtes.

Fast noch einfacher wird die Schaltung bei induktiver Koppelung des Kohärers. Für diese gibt Fig. 594 ein Schema. Hier wird der Empfangsdraht wieder durch Schieber bei a an eine Reihe Induktionswindungen angeschaltet und in die Leitung, die von dem Empfangsdraht zur Erde führt, ist noch eine Kapazität K_2 und eine Kapazität K_1 eingeführt. So kann der Luftleiter abgestimmt werden auf die ankommenden

Wellen. An die Spule des Luftleiters ist dann der primäre Schwingungskreis direkt angeschaltet. Er besteht aus einer primären Spule und zwei Kondensatoren K_2 und K_3. Durch Veränderung dieser Kondensatoren und durch den variablen Schieberkontakt bei b an der Spule P kann man diesen primären Kreis wieder auf die Schwingungen des Luftleiters abstimmen. Induktiv und zwar lose gekoppelt ist nun der Schwingungskreis des Kohärers C, der eine Kapazität K_4 besitzt und durch den Schieber d an eine variable Zahl von Windungen der sekundären Spule T angeschaltet werden kann. Da der Kohärer selbst beim

Fig. 594.



Stromdurchgang eine variable Kapazität besitzt, so schaltet man noch parallel zu ihm einen Kondensator K_5, durch den man die Gesamtkapazität regulieren kann.

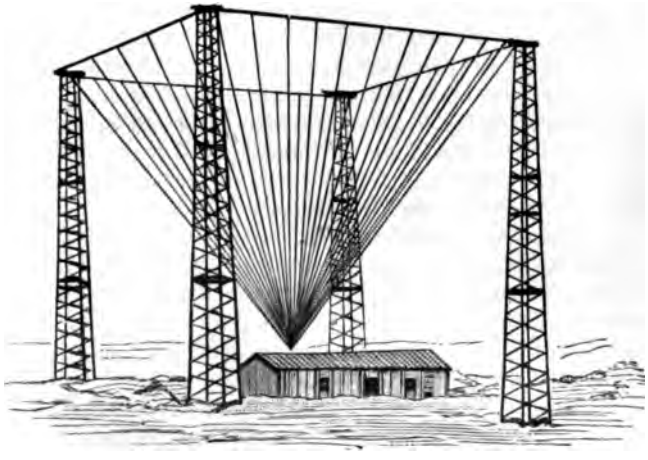
Wenn so durch Abstimmung aller Teile des Empfangsapparates aufeinander und auf den Sendeapparat die Empfindlichkeit des Empfängers auf das Maximum gesteigert ist, so kommt es nur darauf an, von der Sendestation möglichst viel Energie in den Raum hinauszusenden, um die Entfernungen, auf die man drahtlos telegraphieren kann, immer mehr zu vergrößern. Um die primäre Energie zu erhöhen, muß die Spannung im Sender und damit die Schlagweite der Funkenstrecke vergrößert werden, wobei aber natürlich der lange Funken noch oszillatorisch bleiben muß. In solchen langen Funkenstrecken treten aber, wie sich zeigte, sehr erhebliche Dämpfungen der Schwingungen auf, so daß die Ausstrahlung der Wellen trotz der langen Funken gering bleibt. Um diesen Übelstand zu ver-

meiden, wendet man statt eines langen Funkens vielmehr eine Reihe kleiner Funken hintereinander an, man arbeitet, wie man es nennt, mit unterteilter Funkenstrecke. Wenn man parallel zu den einzelnen Funken Kondensatoren schaltet, so ist die Dämpfung in einer solchen Serie von Funken kleiner als in dem einzelnen langen Funken.

Wenn wir kurz die Hauptprinzipien der neuesten Entwickelung der drahtlosen Telegraphie zusammenfassen wollen, wie sie sich aus den einfachen Hertzschen Versuchen entwickelt hat, so sind diese folgende: 1. die Anwendung langer Antennen, 2. die Erzeugung der Wellen von großer Länge (200 bis 300 m) in Flaschenkreisen, 3. indirekte Verbindung der Antennen sowohl mit dem Flaschenkreis wie mit dem Kohärer, 4. Anwendung sehr hoher Spannungen, 5. Abstimmung (Resonanz) aller Teile der Sende- und Empfangsstation aufeinander, 6. möglichste Steigerung der Empfindlichkeit des Kohärers.

Die drahtlose Telegraphie kann natürlich mit der gewöhnlichen Telegraphie auf Drähten unter normalen Umständen nicht konkurrieren

Fig. 595.



und will es auch nicht. Sie bietet aber eine willkommene Ergänzung derselben immer da, wo eine Drahtverbindung zwischen zwei Stationen nicht oder nicht leicht auszuführen ist. Ihre hauptsächlichste Verwendung hat sie bisher gefunden zur Verbindung von Schiffen mit dem Festland und von Schiffen untereinander. Die Antennen werden dabei an den Schiffsmasten befestigt, am Land häufig an Leuchttürmen aufgezogen. Mit absoluter Sicherheit kann man heute nach den verschiedenen Systemen auf 300 km Entfernung telegraphieren. Aber dies ist bei weitem nicht die erreichbare und erreichte Grenze. Marconi hat bekanntlich Versuche gemacht, um über den Ozean funkentelegraphische Zeichen zu geben. Den äußeren Anblick seiner Station in Amerika zeigt Fig. 595. Man sieht ein ganzes System von Empfangsdrähten, welche in Form einer umgekehrten Pyramide angebracht sind. Die Höhe der vier Pfosten, an denen die Drähte angebracht sind, beträgt 70 m und sie stehen in den Ecken

eines Quadrats von 60 m Seitenlänge. Die Spannung der Wellen ist so groß, daß man an jeder Stelle aus den Drähten 30 cm lange Funken ziehen kann. Wenn nun auch berichtet wurde, daß einmal ein wirklicher Depeschenverkehr über den Ozean gelungen sei (am 22. Dez. 1902), so ist doch, nachdem keine weiteren Meldungen darüber gekommen sind, das Resultat noch zweifelhaft. Sicher ist dagegen, daß der Dampfer „Philadelphia" auf der Fahrt von Europa nach Amerika noch bis auf 2400 km von der Marconistation in Cornwall verständliche Depeschen erhielt. Das ist bereits eine Entfernung, welche zu erreichen man vor wenigen Jahren noch nie geglaubt hätte. Bei diesen großen Entfernungen, bei welchen die Krümmung der Erdkugel bereits kilometerhohe Hindernisse zwischen den beiden Stationen hervorbringt, tritt die Frage auf, ob denn wirklich die elektrischen Wellen durch den Luftraum von der einen zur anderen Station gelangen. Es ist das von vornherein sehr unwahrscheinlich. Wahrscheinlich ist, daß die Wellen sich zum großen Teil längs der Oberfläche der Erde ausbreiten. Daraus läßt sich auch die Tatsache erklären, daß die drahtlose Telegraphie über der Meeresoberfläche auf viel weitere Entfernungen möglich ist, als über Land. Das Wasser des Meeres leitet eben die elektrischen Wellen besser weiter, wie das Gestein des Erdbodens.

Bisher besteht die wichtigste Anwendung der drahtlosen Telegraphie in der Verbindung von Schiffen mit dem Festlande und untereinander. Welche enorme Bedeutung sie dabei erlangen kann, dafür hat der japanisch-russische Krieg Beweise in Fülle geliefert. Außerdem hat die drahtlose Telegraphie bereits erhebliche Erfolge bei Landmanövern in Verbindung der einzelnen Truppenteile miteinander, mit dem Hauptquartier und mit Festungen zu erzielen vermocht. Bei den deutschen Manövern hat sich die Brauchbarkeit der drahtlosen Telegraphie für diese Zwecke vollkommen erwiesen. Es werden natürlich zu dem Zweck die Stationen mit allen notwendigen Apparaten zum Geben und Empfangen der Zeichen fahrbar gemacht. Die Antennen werden dabei gewöhnlich durch Fesselballons in die Höhe gezogen. Versuche, zwischen dem Lande und einem Berggipfel, oder zwischen Berghütten untereinander zu telegraphieren, sind bisher nur in geringer Zahl mit gutem Erfolge vorgenommen worden. Im Januar 1899 wurden von Lecarme Experimente angestellt, um auf drahtlosem Wege zwischen Chamounix (1000 m über dem Meere) und dem Observatorium auf dem Montblanc (4350 m über dem Meere) zu telegraphieren. Die Antenne in Chamounix war 25 m lang und bildete mit der Horizontalen einen Winkel von 60^0. Die Verständigung gelang am Tage gut, trotz Wolken und atmosphärischer Einflüsse, am Abend war sie mangelhaft.

Auch zwischen der Erde und einem Ballon zu telegraphieren, ist mit befriedigendem Erfolg gelungen.

Die drahtlose Telegraphie hat zunächst den einen schweren Nachteil vor der gewöhnlichen, daß es ein Depeschengeheimnis bei ihr nicht gibt. Jeder, der in dem Ausstrahlungsbereich des Senders sich befindet, kann durch einen genügend empfindlichen Kohärer die Depeschen abfangen. Man sieht auch nicht wohl ein, wie dem völlig abzuhelfen wäre, da eben die telegraphischen Zeichen nicht an die Drähte gebunden sind,

sondern frei im Raume vorhanden sind. Insofern ist gar nicht daran zu denken, daß je die gewöhnliche Telegraphie durch die Funkentelegraphie vollständig verdrängt werden wird. In vielen Fällen allerdings, wohl bei der großen Mehrzahl aller Telegramme, ist eine Geheimhaltung nicht erforderlich und für diese wird die Funkentelegraphie, wenn sie ebenso sicher und billiger ist als die gewöhnliche, wohl ein reiches Feld finden.

Die drahtlose Telegraphie ist augenblicklich so weit, daß die richtigen Prinzipien für die möglichst vollkommene Wirkung gefunden sind und daß es nur darauf ankommt, durch möglichst sorgfältige Ausführung und gegenseitige Anpassung der Apparate und durch Erhöhung der zugeführten Energie die Erfolge zu steigern, was, wie es scheint, noch in sehr weitem Maße möglich ist. Eine weitere Aufgabe der neueren Technik besteht darin, die Richtungen, in welchen die elektrischen Wellen durch den Raum eilen, möglichst einzuschränken, so daß sie nicht nach allen Seiten, sondern vorzugsweise nach einer Richtung hin fortschreiten. Auf die Bewältigung dieser Aufgabe sind viele Anstrengungen gerichtet, ohne daß jedoch bisher die Praxis davon Nutzen ziehen konnte.

Wir sind am Schlusse unserer Betrachtungen angelangt. Wir haben gesehen, wie in den verschiedensten Gebieten die Elektrizität allmählich in den Dienst der Menschheit gezwungen worden ist. Sie beleuchtet unsere Städte und Wohnungen, sie treibt unsere Maschinen, sie schleppt unsere Bahnen, sie reinigt unsere Kleider, sie kocht unsere Speisen und heizt unsere Zimmer, sie übermittelt unsere Gedanken und Worte in die Ferne, sie erlaubt uns, in das Innere des Körpers zu schauen, im kleinen und im großen spüren wir überall die segensreichen Wirkungen dieser gewaltigen Naturkraft und wir dürfen zum Schluß sagen, da nur durch eifriges Studium der Natur alle diese Anwendungen möglich geworden sind, daß die vorurteilsfreie Erforschung der Natur uns Kräfte gibt und Einrichtungen zu schaffen gestattet, die früher nur für erstrebenswerte, aber unerreichbare Gebilde weitschweifender Phantasie galten.

Register.

Abdrücke, galvanoplastische 583.
Abklingungskonstante 321.
Ableitung zur Erde 5. 17. 23.
Absolutes Güteverhältnis 369.
— Maßsystem 339.
Abstimmung 282. 646. 648.
Abzweigkasten 528.
Acetylen 572.
Akkumulatorbahnen 421. 546.
Akkumulatoren 151. 406.
Akkumulatorenfabrik Hagen i./W. 410.
Aktinium 313.
Aktinoelektrische Wirkung 337.
Allgemeine Elektrizitäts - Gesellschaft (A.E.G.) 232. 375. 386. 391. 418. 432. 455. 458. 468. 497. 518. 533.
Aluminiumgewinnung 569 f.
Aluminiumzellen 154. 436.
Ampère 160. 198. 204.
— (Einheit) 59. 138. 139. 140. 343.
Amperemeter 186. 383 f. 397.
Ampèresche Schwimmerregel 160. 175.
Ampèresches Gestell 178.
Amperestunden 409.
Amperewindungen 169.
Amylacetatlampe 443.
Anion 130.
Ankerrückwirkung 396.
Anker von Maschinen 351.
Anlasser 495.
Anode 129. 290.
Ansammlungsapparate 25.
Anschlußdosen 470.
Antennen 637.
Antikathode 301.
Aperiodische Galvanometer 190.
Äquivalentgewichte 134.
Aragosche Scheibe 221.
Arbeitsleiter 538.
Arbeitsstrom 594.
Arbeitsübertragung 512 f.
Arbeitsverteilung 512 f.
Armatur 351.
Aron, Wattstundenzähler 529.
Astasierungsmagnet 190.
Astatische Galvanometer 190.
— Nadeln 37.
— Stromkreise 199.
Asynchrone Motoren 499.
Atomzerfall 323.
Auer-Oslampen 479.
Ausschalter 77. 473.
Außenpolmaschinen 373.
Automobile, elektrische 552.

Bäder, elektrolytische 569. 577 f.
Ballastwiderstände 88.
Ballistisches Galvanometer 196.
Ballonelement 52.
Batterie, galvanische 48.
— Leydener 29.
Becquerelstrahlen 311 ff.
Bell, Graham 220. 605.
Belegungen einer Flasche 28.
Berliner Mikrophon 614.
Beutelelement S. & H. 54. 95.
Bifilare Rollen 226.
Biot-Savartsches Gesetz 176.
Bleichverfahren, elektrolytisches 573.
Blitzableiter 521.
Bogenlampe, sprechende 631.
Bogenlampen 444 ff.
Bogenlicht 115 f. 440 ff.
Boote, elektrische 554.
Branly 269. 635.
Braun, F. 18. 39. 294. 634. 640.
Braunsche Röhre 294.
Braunsches Elektrometer 18. 39.
Brechungsindex 42.
Brown, C. L. 501.
Brückenverzweigung 71.
Bunsensches Element 53. 95.
Büschellicht 34. 35.

Calciumkarbid 572.
Casellischer Pantelegraph 601.
Clarkelement 98.
Clausius-Arrheniussche Theorie 132 f.
Compoundmaschine 360. 380.
Coulomb (Einheit) 9. 343.
Coulombsches Gesetz 9.
Crookessche Röhren 292.
Curie 312.

Dämpfung 189. 221.
Dampfdynamos 374.
Daniellsches Element 51. 95.
Dauerbrandbogenlampen 457.
Davy 115.
Dekadenrheostaten 87.
Dekapierung 577.
Deprez, M. 185. 231. 526.
— -Galvanometer 185.
— -Unterbrecher 231.
Detektor, elektrolytischer 645.
— magnetischer 643.
Dewarsche Flasche 318.
Dichtigkeit der Elektrizität 24.
Dielektrika 10. 27. 42.

Dielektrizitätskonstante 10. 27. 43. 197.
Differentiallampen 449. 451.
Direkte Koppelung 640. 649.
Disposition, magnetische 369.
Disruptive Entladung 36.
Dissoziation 132. 145.
Doppelbrücke 96.
Dosenrelais 593.
Dosentelephon 608.
Doublet, Zeemansches 331.
Drahtlose Telegraphie 633 ff.
Drehspiegel 265.
Drehströme 261. 385. 389. 497. 518 ff. 534 ff.
Drehstrommotoren 497 f. 505 f.
Drehstromtransformatoren 431.
Drehung der Polarisationsebene 328 f.
Dreieckschaltung 262.
Dreileiterdynamos 534.
Dreileitersystem 532.
Drosselspule 226. 246. 250. 459.
Drosselzellen 154. 436.
Druck, osmotischer 146.
Dunkler Raum 291.
Durchleuchtung 306.
Dynamomaschinen 358 ff.
Dynamoprinzip 358.

Edelmann 192.
Edison 464 ff. 475. 532.
Edisonakkumulator 414 f.
Edisonfassung 466.
Effekt eines Stromes 114. 252 ff. 368. 468.
Effektive Spannung 245.
— Stromstärke 242.
Effektkohlen 460.
Eichung von Meßapparaten 40. 163. 194.
Eigenerregung 360.
Einphasenmotoren 501. 504.
Einphasiger Wechselstrom 389.
Eisenbahnen, elektrische 537 ff.
Eisenverlust 428.
Elektrisiermaschine 10.
Elektrizitätsmenge 8. 143.
Elektrizitätszähler 529 f.
Elektrochemie 556 ff.
Elektroden 38. 95. 116. 129. 289.
Elektrodynamik 198.
Elektrodynamometer 202. 203. 242. 245.
Elektroinduktion 210.
Elektrolyse 129 ff. 557.
Elektrolyser 573.
Elektrolytischer Detektor 645.
— Unterbrecher 233.
Elektrolytkupfer 563.
Elektromagnet 160.
Elektromagnetische Lichttheorie 277.
Elektromagnetisches Maßsystem 343.
Elektromagnetismus 155 ff.
Elektrometer 38.
Elektromobile 552.
Elektromotoren 493 ff.
Elektromotorische Kraft 47. 50. 60 f. 97 f. 144 f. 148.
Elektronen 12. 30. 41 f. 143. 296. 331.
Elektronenstrahlung 310.
Elektroskope 6. 17. 18.
Elektrostatische Einheiten 9.
Elektrostatisches Voltmeter 400.
Elemente, galvanische 47 f. 140 f.
Element, Voltasches 46.
Elmoresche Kupferröhren 564.
Emanation 316 f.
Empfängerdraht 637.
Energie, elektrische 20.
Enge Koppelung 641.
Entladungsströme 257.
Erdleitung 586.
Erdmagnetismus 179. 199.
Erhaltung der Energie 112.
Exnersches Elektroskop 17. 39.
Extraströme 223. 263.

Fahrschalter 544. 553.
Farad 19. 344.
Faraday 10. 11. 42. 129. 135. 165. 180. 206 f. 223. 325.
Faradaysche Gesetze 133 f. 557.
Farbschreiber 594.
Fassungen 111. 466.
Faure 406 f.
Federgalvanometer 60.
Federunterbrecher 230.
Fein, C. u. E. 377. 435.
Feldstärke, magnetische 157.
Fernbahnen 548.
Fernkräfte 41.
Fingerregel 182. 213.
Fixpunktnebenschlußlampe 455.
Fizeau-Kondensator 229.
Flammenbogen 115 f. 440 f.
Flammenbogenlampen 461.
Flaschenkreis 640.
Fluoreszenzschirm 306.
Fokusröhren 301.
Fortpflanzungsgeschwindigkeit, elektrodynamische 268.
Foucaultscher Kommutator 79.
Foucaultsche Ströme 222.
Fremderregung 360.
Fritter 269. 635.
Funke, elektrischer 36. 263. 288. 634.
Funkeninduktoren 229.
Funkenmikrometer 284. 288. 314. 336.
Funkenstrecke, unterteilte 651.
Funkentelegraphie 636 f.

Galvani 44.
Galvanische Elemente 47 f. 140 f.
— Koppelung 281.
Galvanometer 185 ff.
Galvanoplastik 576 ff.

Galvanoskop 56. 75 f.
Galvanostegie 577.
Gauß 339. 585. 586.
Gegenschaltung 500.
Geißlersche Röhren 289.
Gekreuzte Strähne 200.
Geleislose Bahnen 551.
Gesetz der Spannungsreihe 122.
Gleichgewicht der Elektrizität 11.
Gleichrichter 437.
Gleichströme 357 ff.
Gleichstromumformer 435.
Gleitbügel 541.
Gleitrolle 541.
Glockenmagnet 190.
Glühlampen 111. 464 ff.
Glühlampenrheostat 112.
Goldblattelektroskop 6.
Goldgewinnung 568.
Graetzsche Schaltung 436.
Grammäquivalent 135.
Grammescher Ring 353.
Gravieren der Metalle 584.
Gülcher 126. 525.
Gülchersche Thermosäule 126.

Halbringelektromagnet 161.
Harte Röhren 302.
Hartmann & Braun 60. 76. 94. 125. 139. 188. 193.
Hauptstromlampen 447. 450.
Hauptstrommaschinen 359.
Hauptstrommotoren 496 f. 542.
Hebelausschalter 418.
Heberschreibapparat 604.
Hefner-Alteneck 360. 446. 449.
Hefnerkerze 443.
Heizapparate 484 f.
Helium 322.
Hellesen, Trockenelement 55. 95.
Helmholtz 607.
Henry (Einheit) 225. 344.
Hertz, H. 267 ff., 279. 295. 334. 633.
Hintereinanderschaltung 64. 70.
Hittorf 292.
Hitzdrahtmeßinstrumente 398.
Hochfrequenzmaschine 249.
Hochplatten 583.
Hörnerblitzableiter 522.
Holtz, Influenzmaschine 31 f. 34.
Homogenes Magnetfeld 164. 168.
Hopkinson 532.
Horizontalintensität 156. 157.
Hughes 597. 610. 612.
Hysteresis 167. 428. 643.

Impedanz 246. 286.
Indirekte Koppelung 640.
Induktion, magnetische 158.
Induktionsapparate 227 ff.
Induktionsfreie Widerstände 247. 255.
Induktionsmotoren 498.
Induktionsströme 207 ff.
Induktive Belastung 430.
— Koppelung 280. 640. 649.
— Widerstände 247.
Induktorrollen 219.
Industrieller Wirkungsgrad 515.
Induzierte Radioaktivität 315. 321.
Influenz 22 ff.
— magnetische 158.
Influenzmaschinen 30 ff.
Inkonstante Elemente 100.
Inkrustieren der Metalle 584.
Innenpolmaschinen 375.
Intensität eines Stromes 59.
— magnetische 157.
Interurbaner Telephonverkehr 628.
Ionen 130. 557.
Ionisierung der Luft 308. 314.
Isolatoren 6. 7. 24. 83.

Jakobi 576.
Janussystem 625.
Joulesches Gesetz 109 f. 115.

Kabel 602.
Kabeltelegraphie 603.
Kadmiumelement 98.
Kalorieen 402. 483.
Kanalstrahlen 298. 310.
Kapazität 14. 19. 25 f. 40. 196. 629.
— von Akkumulatoren 406. 409. 415.
Karbide 572.
Kathode 129.
Kathodenstrahlen 292 ff.
Kation 130.
Keiser & Schmidt 88.
Kelvin, Lord 38. 96. 288. 604.
Kerntransformatoren 429.
Kette, galvanische 48.
Kirchhoff 73. 265.
Klangfarbe 607.
Klappenschrank 623.
Kleinmotoren 495.
Klemmenspannung 68. 100 f. 367 ff.
Klingeln, elektrische 183.
Knallgasvoltameter 138.
Kochapparate 484 f.
Koeffizient der Selbstinduktion 224.
Körnermikrophone 614.
Koerzitivkraft 166.
Kohärer 269. 635 f.
Kohlrausch, F. 94. 203.
Kohlrauschscher Kondensator 26.
Kollektor 356.
Kollektormotoren 504. 549.
Kommutatoren 78 f.
Kompensationsapparat 104 f.
Kompensationsleitung 532.

Kompensationsmethode 99.
Kondensator 25. 229. 257 f. 603.
Konduktoren 11.
Kontakte 111. 466.
Kontaktelektrizität 48.
Kontaktrolle 541.
Kontroller 544. 553.
Koppelung, enge und lose 280. 640.
— induktive 280. 640.
Kopiertelegraphen 601.
Korrespondenzschalter 474.
Kraftliniendichte 372.
Kraftlinien, magnetische 163. 214.
Kraftübertragung 511 ff.
Kraftverteilung 509. 512.
Kriziksche Stäbe 452.
Kryptoskop 306.
Kupfergewinnung 565.
Kupferverlust 428.
Kupfervoltameter 139.
Kurbelrheostaten 88. 89. 381.
Kurzschluß 66. 96. 127. 379. 409. 474.
Kurzschlußanker 498.

Ladung 8.
Ladungsströme 257.
Lampen, elektrische 444 ff.
Le Chateliersches Thermoelement 125.
Leclanché-Element 54. 95.
Leerlaufsarbeit 493.
Leiter 6. 7. 24. 50. 82. 83. 93. 108. 129.
— erster Klasse 50. 82. 83. 108.
— zweiter Klasse 50. 83. 93. 129.
Leitfähigkeit 82.
Leitungsblitzableiter 521.
Leitungsfähigkeit, magnetische 170.
— spezifische 79 f.
Leitungsverlust 515.
Lenzsches Gesetz 212.
Leydener Flasche 28 f.
Lichtbogen 115 f. 569. 571.
Lichtbogenheizung 490. 571.
Lichtelektrische Wirkung 336.
Liliputbogenlampe 462.
Linienbatterie 591.
Linienwähler 621.
Linke-Hand-Regel 182.
Lochanker 370.
Löffeltelephon 608.
Lokomotiven, elektrische 548.
Lose Koppelung 281. 641. 650.
Lösungen 132. 145.
Lösungsdruck 146.
Luftthermometer 15.
Lummer-Brodhunsches Photometer 442.

Magnetelektrische Maschine 220. 351.
Magnetfeld, homogenes 164. 168.
Magnetische Kraftlinien 163.
— Leitungsfähigkeit 170.
— Wage 174.
Magnetischer Detektor 643.
— Widerstand 171 ff. 369.
Magnetisches Moment 156.
Magnetisierungsspule 159.
Magnetoinduktion 210 f. 350 f.
Magnetomotorische Kraft 170.
Manchestermaschine 370.
Manteltransformatoren 429.
Marconi 633 ff. 643. 651.
Maxwell 42. 43. 216. 277.
Maxwellsche Regel 216.
Maxwellsches Gesetz 43.
Megohm 83.
Mehrphasenströme 261.
Meidingersches Element 52. 95.
Metallinkrustationen 584.
Metallisieren 582.
Metallurgie, elektrische 556 ff.
Mikrofarad 19.
Mikrohm 82.
Mikrophon 85. 610 ff.
Mikrotelephone 619.
Mitgeteilte Radioaktivität 315.
Mix & Genest A.-G. 183. 608. 615. 619. 625. 627.
Moissan 571.
Molekularströme 204. 329.
Momentane Ströme 195.
Moment, magnetisches 156.
Mordeymaschinen 394.
Morseapparat 588 f.
Morseschlüssel 587.
Morseschrift 593.
Motoren, elektrische 493 ff.
Motorlampe 458.
Motorunterbrecher 231.
Multiplexsystem 627.
Multiplikator 37. 76. 188.
Multipolare Maschinen 371.

Nadelgalvanometer 185. 188.
Nadeltelegraphen 586.
Nebeneinanderschaltung 65. 70.
Nebenschlußlampen 448. 450.
Nebenschluß, magnetischer 190.
Nebenschlußmaschinen 359. 379. 415 f. 580.
Nebenschlußmotoren 494 ff.
Nebenschlußregulator 381.
Neefscher Hammer 183.
Nernstlampen 477 f.
Nicolsches Prisma 326.
Normalelemente 98.
Normalen für Selbstinduktion 225. 247.
Normalohm 85 f.
Nutenanker 370.
Nutzeffekt der Kraftübertragung 515.
— von Akkumulatoren 410.
Nutzstrom 254.

Oberirdische Stromzuführung 538 f.
Obertöne 607.

Oerlikon, Maschinenfabrik 394. 497. 501. 518.
Oerstedt 175.
Öffnungsfunke 227.
Ohm (Einheit) 64. 81. 344.
Ohmsches Gesetz 62 f.
— — für den Magnetismus 172.
Öltransformatoren 431. 519.
Ortsbatterie 591.
Osmiumlampen 479.
Osmotischer Druck 146.
Oszillationen, elektrische 263. 634 f.
Oszillator, Righischer 272. 635.
Ozonröhre 574.

Pacinottischer Ring 353.
Pantelegraph 601.
Panzergalvanometer 191.
Parallelschaltung 65. 70.
Peltiersche Wärme 119.
Permanente Magnete 159.
Permeabilität, magnetische 170.
Phasen 240. 251.
Phasendifferenz 258.
Phasenfaktor 254. 256.
Phosphoreszenz 293.
Photometer 442.
Pixii 351.
Planté 404.
Pohlscher Kommutator 78.
Polarisation des Lichtes 326.
— galvanische 149. 559 f.
Polarisationsbatterie 151.
Polarisationsstrom 149 f. 403.
Polarisierte Farbschreiber 595. 603.
Polarisiertes Relais 592. 603.
Pole eines Elements 48.
Pollose Magnete 159.
— Transformatoren 428.
Polonium 313.
Polschuhe 161.
Positives Licht 291.
Potential 13.
Präzisionsamperemeter 77. 186.
— für Wechselstrom 243.
Präzisionsvoltmeter 186. 245.
Präzisionswattmeter 256.
Profilinstrumente 400.
Prometheus, Kochapparate 487.
Pupinspulen 630.
Pyrometer, thermoelektrische 125.

Quadrantelektrometer 38 f.
Quecksilberbogenlampe 118.
Quecksilberunterbrecher 230.

Radioaktivität 312.
Radium 313.
Ramsay 321.
Rechte-Hand-Regel 213.
Reduktionsfaktor 194. 243.
Reibzeug 10.
Reis, Philipp 605.
Relais 590 f.
Repulsionsmotoren 505.
Resonanz 278. 646 ff.
Reversierwalze 544.
Rieß 15.
Righischer Oszillator 272. 635.
Ringtelephon 608.
Röntgenstrahlen 298 f.
Rotationen, elektrodynamische 222.
— elektromagnetische 180 f.
Rückstrom 603.
Ruhestrom 594.
Ruhmkorff 229.

Sammelschienen 528.
Saugwirkung der Spitzen 30.
Schaltbrett 527.
Scheidungskraft, elektrische 49. 58.
Schichtung 290.
Schlagweite 236. 288.
Schleifenleitung 629.
Schleifenwickelung 388.
Schleppschiffahrt, elektrische 555.
Schlüpfung 499.
Schmelzofen, elektrischer 571.
Schnellbahnen 549.
Schreibtelegraphen 585 ff.
Schwimmerregel, Ampèresche 160. 175.
Schwingungen, elektrische 264 f. 634 f.
Seebeck 120.
Seillampe 454.
Sekundäre Elemente 151. 403.
— Prozesse 130 f.
Sekundärgeneratoren 427.
Selbstauslösung 595.
Selbstinduktion 223. 246.
Selbstpotential 224. 246. 247 ff.
Selenzellen 84.
Sendedraht 637.
Serienmaschine 379.
Serienschalter 473.
Sicherheitsschalter 475.
Sicherungen 475.
Siemens, W. 87. 190. 357. 574. 604.
Siemensprozeß 568.
Siemens-Schuckert-Werke 373 f. 389. 391. 431. 432. 454. 462. 534.
Siemens & Halske 54. 77. 91. 102. 104. 126. 186. 192. 193. 243. 245. 248. 303. 469. 480. 537. 565. 566. 568. 592. 614.
Silbervoltameter 140.
Simonunterbrecher 235.
Slaby, A. 634.
Solenoid 168.
Spannung 13 f. 16. 24 f. 40.
Spannungsmesser 17. 40.
Spannungsreihe, thermoelektrische 119. 120. 122.
Spannungsteiler 533.
Spannungsunterschied 15. 46. 50. 100.

Spannungsverlust 68.
Spezifische Leitungsfähigkeit 79 f.
Spezifischer Widerstand 63. 79 f.
Speiseleitung 540.
Spiegelgalvanometer 188.
Spitzen 21. 29. 30.
Spulengalvanometer 76. 185. 192. 193.
Stäbchenmikrophone 613.
Steckkontakte 470.
Stehende Wellen 638. 639.
Steinheil 586.
Sternschaltung 262.
Stiftschreiber 594.
Stöhrermaschine 351.
Stöpselrheostaten 87 ff.
Strahlen, elektrische 275 ff.
Streuung der Kraftlinien 166. 370.
Stromdichtigkeit 563.
Strom, elektrischer 37. 55 ff.
Stromkreis, einfacher 59 f.
— verzweigter 69 f.
Stromsammler 356.
Stromstärke 59 f. 102 f. 136 f. 185. 186 ff.
Stromverzweigung 69 ff.
Strowgersches System 624.
Stufenschalter 495.
Summerumformer 249.
Swanfassungen 466.
Syphonrekorder 604.
Szintillieren 319.

Tantallampe 480.
Taster 587.
Telefunkensystem 645.
Telegraphenelement 53. 95.
Telephon 220. 605 ff.
Temporäre Magnete 159.
Teslaversuche 283 ff.
Thermoelektrische Spannungsreihe 119. 120.
Thermosäule 121. 123.
Thermoströme 120 ff.
Thomsonbrücke 96.
Thomson-Houstonzähler 531.
Thomson-Galvanometer 191.
Thorium 312.
Trambahnen, elektrische 537 ff.
Transformatoren 385. 423 ff. 460. 534 ff.
Transmitter 611.
Transversalwellen 277. 326.
Treidelei, elektrische 555.
Triplet, Zeemansches 330.
Trockenelemente 55. 95.
Trolleydraht 538.
Trommelanker 360 ff.
Turbinenunterbrecher 232.
Turbodynamos 374.
Typendrucktelegraph 597.

Übergangswiderstand 154.
Ultraviolettes Licht 335.
Universalgalvanometer 91. 102.
Universalmeßbrücke 94.
Universaltransmitter 614.
Unterbrecherfeder 183.
Unterirdische Stromzuführung 545.
Unterteilte Funkenstrecke 651.
Uranstrahlen 312.

Verkettete Drehströme 261. 390.
Vermittelungsämter, telephonische 622 ff.
Ventilierte Kapselung 543.
Vertikalgalvanoskop 75.
Vielfachumschalter 627.
Vielpolige Maschinen 371.
Volt (Einheit) 16. 344.
Volta 44.
Voltameter 138 f.
Voltasches Element 46.
Voltmeter 19. 101. 382. 397.
— elektrostatisches 400.
Voltohmröhre 304.

Wage, magnetische 174.
Wanderung der Ionen 133.
Wärmetönung 145. 561.
Wasservoltameter 139.
Watt (Einheit) 114. 341. 343.
Wattmeter 255. 401.
Wattstundenzähler 529.
Weber, Wilhelm 202. 339. 586.
Wechselströme 93. 203. 208. 218. 237. 239. 425 f. 441. 457. 497. 534 ff.
Wechselstrommaschinen 387 ff.
Wehneltunterbrecher 233.
Weiche Röhren 302.
Wellendetektoren 642.
Wellenlänge 278. 639.
Wellenmesser 646 f.
Wellenwickelung 388.
Wheatstone 590. 602.
Wheatstonesche Brücke 72 f. 89 ff.
Widerstand 61 ff. 79 f. 95.
— magnetischer 171 ff. 370.
Widerstandskasten 87 ff.
Widerstandskoeffizient 82.
Wimshurstmaschine 34 f.
Wind, elektrischer 21.
Wirbelströme 222. 363. 378.
Wirkungsgrad, industrieller 515.
— von Dynamomaschinen 369.
— von Transformatoren 428.
Wismutspirale 163.

Zahl der Kraftlinien 164. 169.
Zahnanker 370.
Zeemansches Phänomen 329.
Zellenschalter 417.
Zentimeterwürfel 81.
Zinkgewinnung 566.
Zinksulfidschirm 319.
Zinngewinnung 568.
Zusatzwiderstand 456.
Zweileitersystem 532.
Zweiphasenstrommaschine 391.

Im gleichen Verlag erscheint soeben:

Kurzer Abriß der Elektrizität.

Von Dr. L. Graetz,

Professor an der Universität München.

Mit 167 Abbildungen.

Vierte verbesserte Auflage.
16.—20. Tausend.

Preis elegant gebunden
3 Mark.

In diesem **kurzgefaßten Buch,** welches man in einigen Stunden durchlesen kann, hat der Verfasser eine zusammenhängende **Übersicht der Haupttatsachen** auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre und ihrer **wichtigsten Anwendungen** gegeben. Es ist nicht jedermanns Sache, aus einem so umfangreichen Gebiet das Wichtigste von dem weniger Wichtigen zu sondern. Deswegen hat der Verfasser, vielfachen Wünschen, die namentlich aus Lehrerkreisen an ihn gerichtet waren, entsprochen und in diesem kurzen Buch eine **Darstellung des Wesentlichsten** gegeben. Daß er es verstanden hat, auch in diesem kleinen Werke ein volles Verständnis der behandelten Gegenstände zu erreichen, wird von der Kritik einstimmig betont und besonders warm wird dieses Buch **von Lehrern an mittleren Unterrichtsanstalten** öffentlich und privatim ihren Schülern empfohlen. In diesem Werke, das **kein bloßer Auszug** aus dem größeren ist, sondern sich auch durch den Gang und die Darstellung von jenem unterscheidet, werden die Erörterungen der technischen Anwendungen gleich an die Behandlung der wissenschaftlichen Lehren angeschlossen, wodurch insbesondere trotz des reichen Inhalts die große Kürze ermöglicht wurde.

Aus den vielen anerkennenden Besprechungen über das Buch seien hier nur die nachfolgenden angeführt:

Dinglers polytechnisches Journal, Stuttgart.

Unterstützt von zahlreichen guten Abbildungen und einer allen Anforderungen Rechnung tragenden Ausstattung, ist dieses Werk als eines der besten Beiträge auf dem Gebiete der populären elektrotechnischen Literatur zu bezeichnen. *A. P.*

Zeitschrift für Elektrochemie.

Graetz ist einer der erfolgreichsten Schriftsteller auf dem Gebiete der elementaren Darstellung über Elektrizität. Ref. kennt kein besseres Buch für den ersten Anfang elektrischer Studien. Der Anfänger, der begonnen hat, es zu lesen, wird es auch durchlesen. *H. D.*

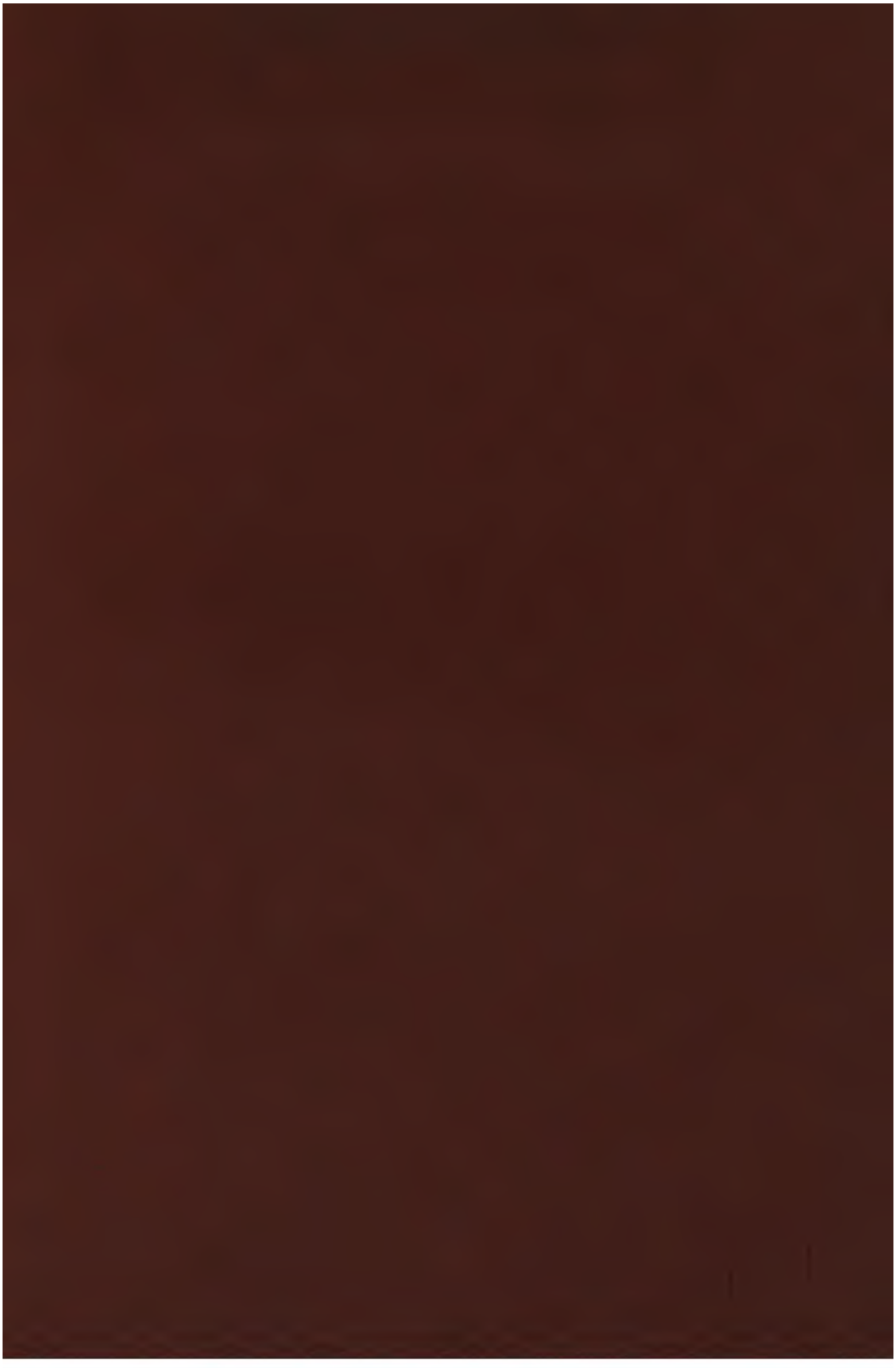
Gymnasium, Paderborn.

Wenige Bücher sind so schnell verbreitet worden wie die Elektrizität von Graetz. ... Man kann also sicher sein, aus diesem Buche zu lernen, wie es heute in der technischen Welt, in der Praxis aussieht, und nicht nur, was die Mechanikerkataloge seit Jahren aufführen. Für heranwachsende Schüler, zu Prämien, aber auch für alle Erwachsene, die nicht Fachleute sind, ist das Buch aufs wärmste zu empfehlen. *A. Schmidt.*

Zeitschrift für Realschulwesen, Wien.

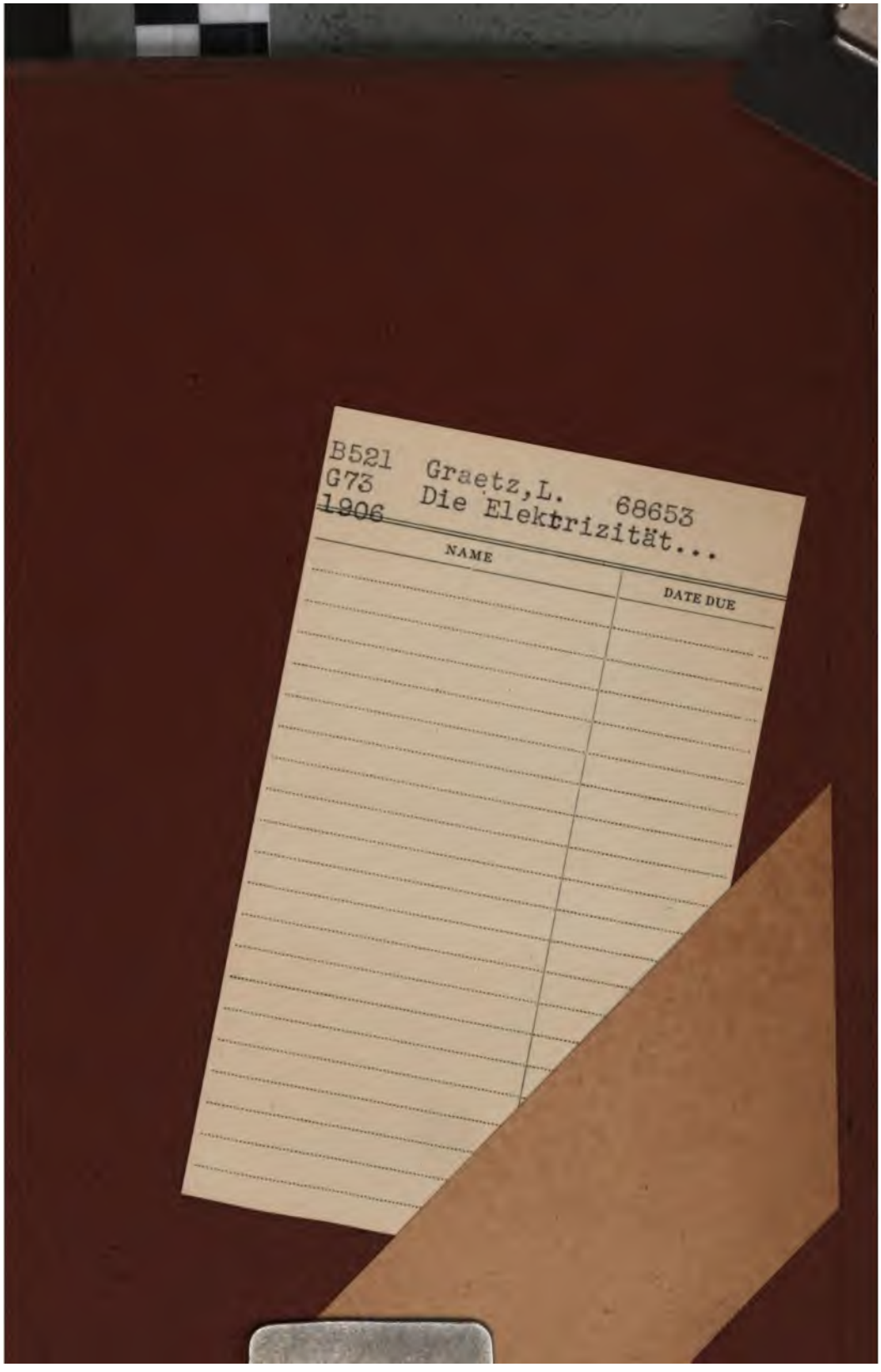
... Die starke Berücksichtigung der neueren Errungenschaften, die anregende Schreibweise und die prächtige Ausstattung machen das Buch in ganz besonderer Weise geeignet, Freude an dem Gegenstande zu erwecken und zu erhalten. Es sei daher neuerlich den Schülerbibliotheken der höheren Schulen wärmstens empfohlen. *Konrad Kraus, Wien.*

Verlag von J. ENGELHORN in Stuttgart.



LANE MEDICAL LIBRARY

To avoid fine, this book should be returned on or before the date last stamped below.


B521
G73
1906
Graetz,L.
68653
Die Elektrizität...
NAME
DATE DUE